

České vysoké učení technické v Praze
Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i.
Český hydrometeorologický ústav
Sweco Hydroprojekt a.s.



**FAKULTA
STAVEBNÍ
ČVUT V PRAZE**

metodika

Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině

Petr Kavka, Marek Kašpar a kol.
2023

České vysoké učení technické v Praze

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i.

Český hydrometeorologický ústav

Sweco Hydroprojekt a.s.

Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině

Certifikovaná metodika

Petr Kavka, Marek Kašpar, Lenka Crhová, Martin Pavel, Miloslav Müller, Vojtěch Bližňák, Filip Hulec, Luděk Strouhal, Martin Landa, Lenka Weyskrabová, Jan-František Kubát, Martin Stehlík, Martin Pecha, Vojtěch Svoboda

Dedikace

Metodika vznikla jako výstup projektu NAZV QK1910029 „Předchozí nasycenost a návrhové srážkové intenzity jako faktory odtokové odezvy na malých povodích“ řešeného v letech 2019–2022.

Metodika byla certifikována Státním pozemkovým úřadem pod číslem: 2/2023/SPU/O

ISBN: 978-80-01-07115-1

Oponenti:

Ing. František Pavlík, Ph.D., Státní pozemkový úřad

Ing. Adam Vizina, Ph.D., VÚV TGM

Praha, 2023

Obsah

1	Cíl metodiky.....	4
2	Vlastní popis metodiky.....	6
2.1	Vodohospodářská opatření v krajině	6
2.2	Využití hydrologických modelů pro navrhování staveb v krajině.....	9
2.2.1	Metoda CN a její využití v prostředí ČR.....	10
2.2.2	Komentář k vybraným modelům používaným v ČR využívajících metodu SCS – CN.....	14
2.2.3	Fyzikálně založené modely.....	15
2.3	Návrhové srážky na území ČR.....	16
2.3.1	Velikost návrhových šestihodinových intenzit deště	17
2.3.2	Časový průběh návrhových srážek	18
2.3.3	Předpokládaná nasycenost povodí před návrhovými srážkami	19
2.4	Ostatní vstupní prostorová data nutná pro hydrologické modelování	20
2.5	Návrh svodných a odváděcích prvků v ploše povodí.....	22
2.6	Příklady využití.....	24
3	Srovnání novosti postupů.....	29
3.1	Návrhové srážky	29
3.1.1	Použitá datová základna	29
3.1.2	Regionální frekvenční analýza adjustovaných radarových dat.....	31
3.1.3	Frekvenční analýza staničních měření krátkodobých intenzit srážek.....	32
3.1.4	Určení velikosti návrhových úhrnů srážek	33
3.1.5	Analýza časového průběhu srážek.....	33
3.1.6	Vyjádření očekávané předchozí nasycenosti.....	34
3.1.7	Další zpracování návrhových hodnot krátkodobých úhrnů srážek	34
3.2	Navrhování vodohospodářských opatření v krajině.....	35
3.2.1	Nestandardní a standardní hydrologické údaje povrchových vod	35
3.2.2	Principy hydrologických modelů	36
3.2.3	Komentář k dalším metodickým pokynům zmiňujícím hydrologické modely	38
4	Ekonomické aspekty	40
5	Popis uplatnění metodiky.....	40
6	Seznam použité související literatury	41
6.1	Předpisy a normy.....	43
7	Seznam publikací, které předcházely metodice a byly publikovány, pokud existují, případně výstupy z určité znalosti, jestliže se jedná o originální práci	44
8	Přílohy.....	46
8.1	Tabulka tvarů šestihodinových srážek	46
8.2	Návrhové šestihodinové srážky.....	49
8.3	Pravděpodobnosti zastoupení tvarů šestihodinových srážek a stupeň možného extrémního nasycení.....	52

1 Cíl metodiky

Metodika "Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině" navazuje na předchozí stejnojmennou metodiku z roku 2019, která byla vytvořena v rámci projektu NAZV QJ1520265 řešeného v letech 2015-2017. Zásadní inovativní přístup této nové metodiky spočívá v odvození návrhových šestihodinových úhrnů srážek na základě kombinace dvacetileté řady adjustovaných radarových měření a třiceti a víceletých řad ze srážkoměrů. Druhou důležitou inovací je stanovení pravděpodobností výskytu šesti průběhů srážek v kombinaci s vyjádřením možného výskytu zvýšeného předchozího nasycení.

Navrhovaná opatření mimo jiné slouží k ochraně půdního fondu jako protierozní opatření, anebo k retenci či bezpečnému převádění povodňových průtoků. Realizována mohou být například v rámci komplexních pozemkových úprav. Vodohospodářské stavby v ploše povodí a na drobných tocích jsou podporovány mnohými dotačními tituly (MZe, MŽP, AOPK atp.).

Metodika má sloužit jako návod pro navrhování vodohospodářských opatření v ploše povodí a na drobných vodních tocích. Hlavním nástrojem těchto návrhů je hydrologické modelování. Nevhodná volba modelu a vstupních dat, zejména srážek a jejich časového průběhu, může způsobit nedostačenou účinnost opatření anebo jejich předimenzování. Metodika je pomocníkem pro správnou volbu modelu, návrhových srážek a pro účelné navrhování vodohospodářských staveb v České republice.

Typy opatření	Popis základních vodohospodářských opatření v krajině • zasakovací prvky, • odváděcí prvky, • úpravy na drobných vodních tocích. Součást KPÚ, ÚSES, technická protierozní opatření.
Hydrologické modely	Hydrologické modelování jako nástroj získání návrhových parametrů opatření v krajině. Výběr modelu je závislý na řešené úloze. Nejdůležitější jsou dvě skupiny modelů. Modely založené na metodě SCS-CN v kombinaci s jednotkovým hydrogramem. Nejčastěji využívaná metoda pro navrhování opatření na návrhové srážky. Integrované v Atlas HYDROLOGIE, HEC-HMS. Epizodní procesně (fyzikálně) založené modely. Využití především při posouzení proběhlých událostí, detailní řešení, výhodné ve složitých podmínkách. V Českém prostředí existují vstupní data pro SMODERP a EROSION 3D.
Srážková data	Zásadní zdrojová data pro hydrologické modely. Tato metodika popisuje šestihodinové návrhové srážky včetně pravděpodobnosti zastoupení variant průběhu srážek. Tato délka srážky popisuje variabilitu subdenních srážkových dat. Klíčové charakteristiky jsou: • prostorově distribuované návrhové srážky pro doby opakování 2–100 let, • prostorově distribuované zastoupení variant průběhu návrhových srážek v závislosti na době opakování, • prostorově distribuovaná pravděpodobnost abnormální počáteční nasycenosti.
Dostupnost dat	Portál rain.fsv.cvut.cz: • online data pro povodí IV. řádu pomocí aplikace Gisquick bez nutnosti specializovaného SW, • formou WMS a WPS služeb z prostředí QGIS/GRASS – pro polygony a body, • kromě srážkových dat jsou dostupná také data o půdách a povodích do 5 km².
Ostatní vstupy	Popis dalších vstupních dat pro hydrologické modely • morfologie, • půdní charakteristiky, • data o využití území, • převodníky a číselníky pro vybrané modely.
Návrh opatření	Metodický návod, v kterém je popsán ansámblový přístup využití množství vstupních dat do hydrologických modelů pro získání parametrů pro návrh opatření: • výběr modelu, • podle lokality, • objem návrhové srážky pro danou dobu opakování, • zastoupení tvarů hydrogramů pro danou dobu opakování, • určení pravděpodobnosti abnormálního počátečního nasycení, • získání návrhového parametru (objem, kulminační průtok) pomocí vah scénářů.

2 Vlastní popis metodiky

V této kapitole je představen způsob získání návrhových parametrů pro navrhování vodohospodářských opatření v krajině a na drobných vodních tocích. Jsou zde popsány hydrologické modely – nástroje pro získání návrhových dat včetně popisu využití srážkových a dalších vstupních dat. Vhodně navržené prvky tvoří funkční systém z hlediska ovlivnění vody v krajině a v síti vodních toků. Pro přehlednost je kapitola členěna do pěti hlavních částí. Kapitola 2.1 je věnována typům vodohospodářských opatření v krajině, navazující kapitola 2.2 popisuje hydrologické modely a limity jejich využití. Dále tato kapitola obsahuje komentáře k nejčastěji využívaným modelům v ČR. Klíčová kapitola 2.3 obsahuje popis návrhových srážek a jejich variabilitu z hlediska zastoupení tvarů hyetogramů v kombinaci s uvažovaným stupněm nasycení. Vedle srážkových dat jsou k navrhování klíčová další vstupní data, jejich dostupnost je popsána v navazující kapitole (2.4). Metodickou částí je pak kapitola 2.5, která obsahuje postup zpracování návrhu při zahrnutí variability srážek. Na tuto kapitolu navazuje zpracování typových úloh.

Metodika je koncipována jako aplikovatelný dokument, v přílohách jsou proto publikované přehledové mapy ČR návrhových srážek a pravděpodobnosti zastoupení tvarů hyetogramů včetně pravděpodobné nasycenosti. Vzhledem k velikosti tiskových stran mají spíše informativní charakter. Zdrojem těchto map je certifikovaná mapa s názvem „Návrhové šestihodinové srážky pro doby opakování 2–100 let a prostorové zastoupení tvarů srážek“. Pro maximálně efektivní využití metodiky je vhodné využít popsané mapové a processingové služby provozované na portálu rain.fsv.cvut.cz. Tyto služby jsou postaveny na otevřených (OpenSource) platformách (QGIS a Gisquick) tak, aby byla zajištěna udržitelnost těchto služeb nezávisle na licenční politice komerčních softwarů.

2.1 Vodohospodářská opatření v krajině

Vodohospodářská opatření v krajině obsahují jak úpravy drobných vodních toků, tak opatření v ploše povodí. Opatření v ploše povodí jsou realizována v místech dočasného výskytu povrchové vody, zatímco na vodních tocích je minimální průtok dotovaný z podzemních vod. V obou případech jsou k získání dimenzačních parametrů využívány hydrologické modely. Vodohospodářská opatření jsou součástí projektů vedoucích k ochraně povodí před nepříznivými vlivy povrchových vod, zadržování vody v krajině, zlepšení odtokových poměrů, nebo jsou součástí návrhů přírodně blízkých protipovodňových opatření. Konkrétně se jedná o prvky, které mají protierozní funkci, nebo prvky sloužící k bezpečnému zachycení či odvedení extrémních odtoků z řešené lokality, případně mají funkci opačnou – prvky sloužící k zadržení vody v ploše povodí. Opatření v krajině jsou často součástí realizace plánu společných zařízení v rámci pozemkových úprav (KPÚ). Technický standard dokumentace PSZ (SPÚ, 2022) rozděluje opatření na týkající se cestní sítě, protierozní, vodohospodářská a pro ochranu ŽP v rámci Územního systému ekologické stability (ÚSES). Vodohospodářský aspekt je však možné nalézt ve všech těchto kategoriích.

Typy opatření jsou popisovány v celé řadě dalších publikací, zde je uveden jen jejich základní výčet, související publikace jsou popsány v kapitole 3.2.3. V následující tabulce 1 je uveden přehled opatření spolu s návrhovým parametrem a s vyznačením, zda by primárním podkladem pro dimenzování měl být výpočet pomocí hydrologického modelu nebo na základě dat poskytnutých Českým hydrometeorologickým ústavem – ČHMÚ (viz kap 3.2.1). Parametr průtoků lze použít jednak k posouzení průtočné kapacity a také k posouzení stability (odolnosti proti vymílání).

Tabulka 1: Přehled dimenzovaných protierozních a vodohospodářských opatření v krajině

Opatření	Návrhový parametr	Primární podklad
Odváděcí příkopy	průtok	Návrh modelem
Odváděcí průlehy	průtok	Návrh modelem
Zasakovací příkopy	objem	Návrh modelem
Zasakovací průlehy	objem	Návrh modelem
Stabilizace drah soustředěného odtoku	průtok	Návrh modelem
Ochranné nádrže	průtok, objem, vlna	ČHMÚ
Retenční a sedimentační prostory	průtok	Návrh modelem
Úpravy vodních toků*	průtok	Návrh modelem / ČHMÚ
Propustky, mostky, brody**	průtok	Návrh modelem / ČHMÚ
Ochranné hráze	průtok	ČHMÚ
Protierozní hrázky	objem	Návrh modelem
* podle TNV 75 2102 do velikosti povodí 5 km ² , je možné využívat hydrologické modely		
** podle umístění a velikosti vodního toku.		

Odváděcí příkopy, odváděcí průlehy – tato opatření mají zásadní význam při protierozní ochraně, přerušují délku svahu. Přestože jsou charakterizována jako „odváděcí“, nemá být jejich účelem vodu z krajiny rychle odvést, ale spíše zpomalit a případně nechat zasáknout. To platí zejména o sběrných příkopech / průlezích, které jsou navrhovány ve velmi malém sklonu. Pokud jsou k dispozici pozemky a při menších sklonech svahů (do cca 10 %) jsou vhodnější variantou průlehy. Svodné příkopy / průlehy mohou být v krajině nutné pro překonání výškových rozdílů a svedení vod do vodních linií / toků. Příkopy / průlehy rovněž doprovází v účelných situacích cestní síť a mohou být také doprovodným prvkem protierozních mezí. Odváděcí příkopy a průlehy nad chráněným pozemkem jsou někdy označovány také jako „záchytné“. Více viz (Janeček 2012; Kadlec a kol. 2014).

Zasakovací příkopy, zasakovací průlehy – tato varianta příkopů/průlehů počítá s tím, že by v nich měl být nashromážděn veškerý objem z návrhové srážky. Je vhodná spíše u propustných půd. Návrhy by měly být vedeny přísně vrstevnicově, přesto je vhodné zabezpečit případný přetok vody přes zpevněný profil do stabilizovaných svodnic. Zasakovací příkopy a průlehy jsou někdy také označovány jako „vsakovací“ nebo „retenční“. Více viz (Janeček 2012; Kadlec a kol. 2014).

Stabilizace drah soustředěného odtoku – dráhy soustředěného odtoku se přirozeně v krajině vyskytují v geomorfologicky daných odtokových liniích a jsou počátkem hydrografické sítě. Z proběhlých epizod přívalových srážek by mělo být zřejmé, zda se v nich vyskytují erozně nebezpečné projevy. Stabilizační pás podél drah soustředěného odtoku by měl být zatravněn, nejlépe odolnější směsí trav. Takové linie jsou pak tedy podobné svodnému průlehu. V některých případech je vhodné tlumit energii vody ve svodnici vložением přehrázek nebo jiných zpevňujících prvků. V nejvíce namáhaných částech svodnic lze také doplnit kamenný pohoz. Více viz (Janeček 2012; Kadlec a kol. 2014).

Ochranné nádrže – jsou jimi suché nádrže a dále malé vodní nádrže s vymezeným retenčním prostorem. Podle definice je suchá nádrž (TNV 75 2415 Suché nádrže) vodní nádrž určená k ochraně před účinky povodní, ve které je celkový objem nádrže téměř shodný se součtem ovladatelného a neovladatelného ochranného prostoru. Může mít v poměru k celkovému objemu zanedbatelné stálé nadržení, které plní krajinnotvornou či environmentální funkci. Za malou vodní nádrž (ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže) se považuje vodní nádrž s objemem do 2 mil. m³ a největší hloubkou hladiny nádrže 9 m. Janeček (2012) v souladu se zaměřením své metodiky označuje ochranné nádrže jako protierozní – navrhují se jako účinná opatření k akumulaci, retenci, retardaci a infiltraci povrchového odtoku a k usazování splavenin. Návrh objemu nádrží a parametrů výpusti a bezpečnostního přelivu se provádí podle ČSN 75 2405 Vodohospodářská

řešení vodních nádrží, posouzení bezpečnosti hráze při povodních podle TNV 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních. Pro ochranu před zanášením a jednodušší manipulaci se zachycenými splaveninami mohou být u ochranných nádrží navrhovány sedimentační předzdrže.

Retenční a sedimentační prostory – k zachycení splavenin před vstupem do hydrografické sítě jsou navrhovány sedimentační jímky. Navrhují se zpravidla jako jednoduché zemní zpevněné či nezpevněné jímky na dolním okraji řešeného pozemku nebo na příkopu či průlehu před jeho zaústěním do vodoteče (Kadlec a kol. 2014). Jímky mohou mít i vyloženě technický charakter, např. jako betonové objekty před svodem vody do propustků či vtoku do dešťové kanalizace. Naopak rozsáhlejší sedimentační prostory spíše přírodního charakteru se blíží pojetí tzv. „retenční tůně“. Pro „malé vodní nádrže“ platí, že z celkové normální provozní hloubky je více než třetina hloubky vytvářena vzdouvacím efektem hráze. Tato definice neplatí pro stavby typu tůní. Pokud jsou tůně navrhovány na pozemcích v určitém sklonu, popř. v mírných údolnicích, mohou mít charakter tůní retenčních. Retenční tůně mají přírodě blízký charakter. Jejich prostor vzniká zahloubením pod stávající terén s vyhrnutím zeminy po svahu do podoby přirozeného valu. Na sníženém výtoku do stabilizované svodnice se doporučuje zpevnění lomovým kamenem položeným na sucho v přirozených tvarech. Podle místní situace mohou být retenční tůně po část roku zaplněny vodou, takový prostor představuje v krajině často chybějící biotop. Při předpokládaném posunu klimatu k suchým letním obdobím s epizodami přívalových srážek může soustava retenčních tůní poskytovat nezanedbatelný (byť negarantovaný) retenční objem.

Úpravy vodních toků – rámec pro návrhy úprav toků (revitalizační úpravy, umožnění neškodných rozlivů, cílená ochrana zástavby a infrastruktury, stupně ve dně, prvky zajišťující stabilitu dna atp.) dává norma ČSN 75 2101 Ekologizace úprav vodních toků. Z ní pak vychází technické normy TNV 75 2102 Úpravy potoků a TNV 75 2103 Úpravy řek. Orientační definice „řeky“ přitom počítá s převažujícím říčním prouděním a hodnotami $Q_{90d} > 0,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ a $Q_{330d} > 0,15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Pro specifické úseky toků má obsah normy ČSN 75 2106 Hrazení bystřin a strží aktuální podobu ve formě technických doporučení (MZe, ČSKI, 2020)

Propustky, mostky, brody – tyto objekty se navrhují v souladu s normami ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů a ČSN 75 2130 Křížení a souběhy vodních toků s dráhami, pozemními komunikacemi a vedeními. Propustek slouží k odvedení vody přes násyp zemního tělesa (cesty, silnice, železnice). Nejčastěji se používají propustky trubní, a to do průměru 2 m – při větším profilu se jedná o mostky. Potřebný profil musí vycházet z hydraulického výpočtu, neměl by ale být menší s ohledem na údržbu a čištění než 0,6 m. Mostek má obdobnou funkci jako propustek, jeho světlost je ale větší než 2 m. Výchozím podkladem pro návrh mostu je hladina při návrhovém průtoku, nad níž musí být zachována volná výška min. 0,5 m.

Při zjednodušeném výpočtu kapacity betonového propustku za předpokladu volné hladiny na vtoku i výtoku je maximální kapacita propustku vypočtena podle následujícího vzorce:

$$Q = 24 \cdot D^{8/3} \cdot i^{1/2} \quad (1)$$

kde:

Q je průtok (m^3s^{-1})

D je průměr (m)

i je sklon (-)

Následující tabulka obsahuje maximální průtoky pro nejběžnější rozměry betonových propustků DN 600 až DN 1400 a sklony 0,5 % až 5 %, s uvažovaným Manningovým součinitelem drsnosti $n = 0,013$.

Tabulka 2: Kapacita betonového propustku Q (m^3s^{-1}) dle zjednodušeného výpočtu při daném průměru a sklonu

Kapacita propustku	Sklon					
Průměr	0,5 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %
DN 600	0,43	0,61	0,87	1,06	1,23	1,37
DN 900	0,94	1,32	1,87	2,29	2,65	2,96
DN 1000	1,70	2,40	3,39	4,16	4,80	5,37
DN 1200	2,76	3,90	5,52	6,76	7,81	8,73
DN 1400	4,16	5,89	8,33	10,20	11,77	13,16

Ochranné hráze – tato opatření podél vodních toků jsou součástí protipovodňové ochrany (zejména intravilánu). Ve stísněných podmínkách zástavby mohou být hráze nahrazeny zídkami nebo systémem mobilního hrazení. Návrhy vycházejí zejména z normy TNV 75 2103 Úpravy řek.

Protierozní hrázky – navrhují se zejména na ochranu různých objektů a zástavby před extravilánovými vodami. Na úpatí svahů podporují pozvolné zasakování, popř. mohou být vybaveny vypouštěcím zařízením. Více viz (Janeček 2012; Kadlec a kol. 2014).

2.2 Využití hydrologických modelů pro navrhování staveb v krajině

Realizovaná opatření v krajině a na drobných vodních tocích, jejich dimenzování a posuzování je třeba řešit individuálně pro každou lokalitu zvlášť. Prakticky jedinou možností pro získání návrhových charakteristik v malých povodích je využití hydrologických modelů. To sebou přináší celou řadu nejistot a to:

- kvalita a prostorová podrobnost vstupních dat,
- míra zjednodušení zvoleného řešení příslušného modelu,
- počáteční podmínky a možnosti kalibrace modelů.

Jedním z cílů této metodiky je snížit počet nejistot výběrem vhodné ho modelu s ohledem na aktuální datovou základnu. Modelů existuje nespočet, liší se v mnoha aspektech např. úrovní podrobnosti popisu modelovaného systému a probíhajících procesů. Klasifikací hydrologických modelů opět existuje celá řada, uveďme několik základních hledisek jejich dělení.

- časové měřítko (kontinuální, epizodní),
- velikost domény (globální, regionální, povodí, pozemky či jednotlivé svahy),
- prostorové členění modelované domény (celistvé, částečně nebo plně distribuované),
- složitost popisu procesů v modelovaném systému (datově orientované, konceptuální, fyzikálně založené).

Dalo by se uvažovat o celé řadě dalších hledisek a jejich detailnější kategorizaci, které jsou nad rámec této metodiky. Nejzásadnějším rozdílem mezi typy modelů je podrobnost popisu procesů. Zatímco datově orientované modely vycházejí pouze z empirického vztahu mezi daty typu vstup-výstup, procesně založené modely se snaží matematicky popsat probíhající procesy a jejich interakce fyzikálními rovnicemi s co nejnížší, ale ještě efektivní mírou zjednodušení. Konceptuální modely pak představují širokou škálu přístupů mezi těmito krajními pohledy. Modelovaný systém většinou zjednodušují na několik komponent a popis jejich chování a interakcí může být i v rámci jednoho modelu na různých úrovních podrobnosti. Zásadním pohledem pro výběr modelu – nástroje pro získání návrhových veličin je časové měřítko. Klíčová je kategorie epizodních modelů, neboť návrhové veličiny se získávají modelováním odpovědi na vybranou příčinnou (návrhovou) srážku. Pro aplikační praxi se nabízejí dvě zásadní skupiny modelů.

- modely založené na metodě SCS-CN v kombinaci s jednotkovým hydrogramem,
- epizodní procesně (fyzikálně) založené modely.

2.2.1 Metoda CN a její využití v prostředí ČR

Metoda odtokových křivek SCS-CN (SCS, 1986) je v českých podmínkách jednou z nejrozšířenějších metod pro výpočet úhrnu efektivní srážky. V kombinaci s jednotkovým hydrogramem slouží zároveň pro stanovení maximálního průtoku a případně průběhu povodňové vlny. Výpočetní vztahy lze nalézt v metodikách a normách, které předcházely této práci. Zde jsou uvedeny základní vztahy a nová doporučení, jak tuto metodu použít při současné znalosti srážkových dat a dalších vstupů. Jedná se o konceptuální přístup, který je široce využíván především pro jednoduchost jeho použití a průhlednost metodických postupů. Mezi jeho hlavní nedostatky patří nerespektování změn odtokových podmínek při různých intenzitách deště (při stejném celkovém úhrnu metoda počítá stejnou odtokovou ztrátu bez ohledu na časové rozložení intenzity deště) a rozpor s klasickou teorií nenasyceného proudění. Vzhledem k nenáročnosti na vstupní data, která jsou dnes již dostupná v podobě GIS vrstev, je tato metoda vhodná pro odhad velikosti přímého odtoku (odtokové ztráty) v nepozorovaných profilech vodních toků a při řešení odtoků v ploše povodí. Tato metoda je integrována do řady komerčních i otevřených modelových prostředků, např. do volně dostupného HEC-HMS, Atlas HYDROLOGIE či HydroRAIN. Metoda odtokových křivek je využívána v ČHMÚ jako jedna z metod při ověřování návrhových průtoků, při odvozování standardních i nestandardních hydrologických údajů a při modelování teoretických povodňových vln (viz kapitola 3.2.1).

Výpočet objemu přímého odtoku

Metoda CN odvozuje výšku přímého odtoku ze zákona zachování objemu a z předpokladu, že poměr odtokové výšky k srážkovému úhrnu bez počátečních ztrát (intercepce, povrchová retence) je roven poměru infiltrované části srážky k maximální potenciální retenci. Základní vztah pro určení odtokové výšky uvádí následující rovnice č. (2):

$$H_o = (H_s - I_a)^2 / (H_s - I_a + A) \quad (2)$$

kde:

H_o je výška přímého odtoku (mm)

H_s je celkový srážkový úhrn (mm)

I_a je počáteční ztráta (mm)

A je maximální potenciální retence (mm)

Ke stanovení přímého odtoku (odtokových ztrát) je využívána metoda CN, neboť je dobře aplikovatelná na nepozorovaná povodí a veškerá vstupní data jsou k dispozici. Na základě vstupních dat využití území, hydrologických skupin půd a tabulek CN, jsou vypočteny průměrné hodnoty CN a hodnoty počáteční ztráty I_a (Initial Abstraction), které se vyjadřují jako procentuální podíl maximální potenciální retence A :

$$I_a = \lambda A \quad (3)$$

λ je poměrový koeficient s odvozenou hodnotou 0,2 (20 % vychází z výsledků analýzy na malých experimentálních povodí v USA), ale v odůvodněných případech lze použít jinou hodnotu. Např. pro urbanizovaná hladká povodí bez výrazné vegetace ve výši 10 %, pro povodí s členitým povrchem a hustou vegetací ve výši 25 %. Maximální potenciální retence povodí A je určena na základě hodnoty odtokové křivky CN jako:

$$A = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4)$$

Plocha pozemku pro uvažované intenzity srážek a hodnoty CN

Na základě výše uvedeného výpočtu objemu odtoku je možné pro hodnoty CN stanovit velikosti zdrojové plochy pro jednotkové objemy zasakovacích prvků. Pro kombinaci konkrétní hodnoty CN a úhrnu srážek lze stanovit plochu pozemku pro naplnění 1 m³ objemu zasakovacího prvku podle následujícího postupu. Poměr objemu odtoku k úhrnu přívalové srážky se rovná poměru objemu vody zadržené při odtoku k potenciálnímu objemu, který může být zadržen. Při uvažované počáteční ztrátě 20 %. Po přepočtení na plochy a objemy platí např. následující tabulka.

Tabulka 3: Plocha pozemku v m² potřebná pro naplnění 1 m³ příkopu při odtoku ze srážky P a retenci území vyjádřené hodnotou CN

	P (mm)										
CN	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
CN 35	X	X	X	X	X	X	X	X	14 916	1 988	756
CN 40	X	X	X	X	X	X	X	2 073	715	363	221
CN 45	X	X	X	X	X	5 087	1 024	434	242	156	110
CN 50	X	X	X	X	3 110	741	332	191	125	89	67
CN 55	X	X	X	3 038	666	292	167	109	78	59	47
CN 60	X	X	4 664	713	286	157	101	72	54	42	34
CN 65	X	19 910	934	311	159	99	68	51	40	32	27
CN 70	X	1 729	382	172	101	68	49	38	31	25	21
CN 75	9 329	572	202	108	69	49	37	30	24	21	18
CN 80	1 329	270	122	72	50	37	29	24	20	17	15
CN 85	459	149	79	51	37	28	23	19	16	14	13
CN 90	207	89	53	37	28	22	19	16	14	12	11
CN 95	102	54	36	27	22	18	15	13	12	10	9
CN 100	50	33	25	20	17	14	13	11	10	9	8

Objemy odtoku podle metody čísel odtokových křivek pro různé typy hyetogramů zůstávají stejné. Důležitý je tedy jen celkový úhrn srážky, variabilita je vázána jen na stupeň nasycení povodí. K posouzení, z jaké délky svahu nad sebou pojme průleh objemu odtoku pro různé vstupní podmínky, je možné využít následující tabulku.

Tabulka 4: Délka svahu pro naplnění průlehu o objemu 5 m³ na 1 m délky pro ornou půdu, čtyři varianty hydrologických skupin půd HSP (viz kap. 2.4), dvě varianty nasycení CN a dvě varianty velikosti srážek P

povrch – HSP – var CN – var P	CN	Potenciální retence S (mm)	Srážka P (mm)	Přímý odtok O (mm)	Délka svahu pro naplnění průlehu D (m)
orná – A – CN2 – P50mm	72,0	98,8	50,0	7,1	705
orná – A – CN2 – P80mm	72,0	98,8	80,0	22,8	219
orná – B – CN2 – P50mm	81,0	59,6	50,0	14,9	337
orná – B – CN2 – P80mm	81,0	59,6	80,0	36,3	138
orná – C – CN2 – P50mm	88,0	34,6	50,0	23,9	209
orná – C – CN2 – P80mm	88,0	34,6	80,0	49,6	101
orná – D – CN2 – P50mm	91,0	25,1	50,0	28,9	173
orná – D – CN2 – P80mm	91,0	25,1	80,0	56,2	89

povrch – HSP – var CN – var P	CN	Potenciální retence S (mm)	Srážka P (mm)	Přímý odtok O (mm)	Délka svahu pro naplnění průlehu D (m)
orná – A – CN3 – P50mm	86,4	40,0	50,0	21,5	232
orná – A – CN3 – P80mm	86,4	40,0	80,0	46,3	108
orná – B – CN3 – P50mm	91,4	23,9	50,0	29,6	169
orná – B – CN3 – P80mm	91,4	23,9	80,0	57,1	88
orná – C – CN3 – P50mm	94,8	13,9	50,0	36,5	137
orná – C – CN3 – P80mm	94,8	13,9	80,0	65,4	76
orná – D – CN3 – P50mm	96,2	10,0	50,0	39,7	126
orná – D – CN3 – P80mm	96,2	10,0	80,0	69,1	72

Metoda transformace přímého odtoku

Volba metody transformace přímého odtoku je klíčovou součástí metodického postupu, neboť přímo určuje tvar vlny, a tím i velikost kulminačního průtoku. Pro transformaci přímého odtoku se používají ověřené regresní vztahy s vazbou na fyzicko-geografické charakteristiky povodí. Jako transformační funkce povodí je doporučeno použití jednotkového hydrogramu. Software HEC-HMS nabízí několik typů jednotkových hydrogramů, z nichž metodika používaná na ČHMÚ doporučuje použití jednotkového hydrogramu dle Clarka, která disponuje následující dvojicí parametrů:

- doba koncentrace povodí (Time of Concentration; TC) (h),
- transformační faktor (Storage Coefficient; R) (h).

Pro výpočet doby koncentrace TC je k dispozici několik vztahů, avšak nejpoužívanější a doporučený je vzorec Soil Conservation Service (NRCS, 2010):

$$TC = \frac{T_{lag}}{0,6} \quad (5)$$

kde: T_{lag} je časový interval mezi výskytem maxima příčinné srážky a výskytem kulminačního průtoku v závěrovém profilu povodí daný jako:

$$T_{lag} = \frac{(3,281 \cdot L)^{0,8} (0,0394 \cdot A + 1)^{0,7}}{1900 \cdot \sqrt{Y}} \quad (6)$$

kde:

- L je délka údolnice k rozvodnici (m)
- Y je průměrný sklon povodí (%)
- A je maximální retence povodí (mm)

Hodnota Transformačního faktoru (R) je dána dle vzorce vycházejícího z metodiky odvozené v USA (Straub a kol., 2000):

$$R = a(0,00062137L)^b (5280 \cdot S_{1085})^c \quad (7)$$

kde:

- L je délka údolnice (m)
- S_{1085} průměrný sklon údolnice v úseku mezi 10-85 % délky (-)
- a, b, c jsou parametry

Parametry byly stanoveny na základě zkušeností ze simulačních výpočtů povodňových událostí na území ČR na hodnoty $a = 80$, $b = 0,342$, $c = -0,79$.

Transformace povodňové vlny

V případě, kdy je hydrologický model sestaven z dílčích podpovodí reprezentujících celé řešené povodí, vznikají v modelu prvky představující úseky vodních toků, ve kterých je nutné simulovat postup vlny po toku. Dle posouzení heterogenity řešeného povodí a účelu modelování je doporučeno rozdělení většího řešeného povodí na logická podpovodí o velikostech 1 až 2 km². Pro samotnou transformaci je vhodné využít modelu (například HEC-HMS), který má již integrovanou transformaci ve svých nástrojích. Ze základních transformačních vztahů se nabízí použít metodu Muskingum-Cunge v případě zaměření příčných profilů. Pokud geometrie koryta toku není známa a inundace nemají zásadní vliv při transformaci povodňové vlny, postačí pro odhad postupu povodně metoda Muskingum. Metoda vychází z jednoduché bilance přítoku a odtoku v rámci říčního úseku a je podrobněji popsána v manuálu USACE (1994). Metoda Muskingum má dva parametry (X (-) a K (h)), které je možno odhadnout na základě empirických vztahů:

$$X = 0,5 \cdot \left(\frac{S_{1085} - S_{1085 \min}}{S_{1085 \max} - S_{1085 \min}} \right)^{1/3} \quad (8)$$

kde:

- S_{1085} je průměrný sklon údolnice v úseku mezi 10-85 % délky (-)
- $S_{1085 \min}$ je minimální hodnota zjištěná na území ČR (= 0,0005)
- $S_{1085 \max}$ je maximální hodnota zjištěná na území ČR (= 0,4297)

$$K = \frac{L_t}{3600 \cdot n_K \cdot v_{TC}} \quad (9)$$

kde:

- L_t je délka toku v daném říčním úseku (m), která je určená jako přímková vzdálenost mezi vtokovým profilem mezipovodí a závěrovým profilem (daných souřadnicemi) a vynásobená koeficientem 1,1
- n_K je koeficient uvažovaný hodnotou 3
- v_{TC} je střední rychlost stékání vody v povodí (m·s⁻¹), získaná dle vztahu (10):

$$v_{TC} = \frac{L}{3600 \cdot TC} \quad (10)$$

kde:

- L je délka údolnice (-)
- TC doba koncentrace (h) – viz rovnice (5).

Takto odvozené parametry slouží jako okrajové podmínky srážkoodtokového modelu, například HEC-HMS.

Využití metody CN při odvození standardních a nestandardních údajů podle ČSN 75 1400

V případě vodních děl na vodních tocích je zásadní bezpečnost a zajištění relevantních návrhových dat. Proto je navrhování opatření na síti vodních toků a zpracování a poskytování hydrologických údajů podřízené ČSN 75 1400 „Hydrologické údaje povrchových vod“, podle které se hydrologické údaje rozdělují na standardní a nestandardní. Mezi standardní hydrologické údaje patří nejčastěji využívané hodnoty pro navrhování staveb na vodních tocích, M-denní a N-leté průtoky s dobou opakování 2 až 100 let. Standardní údaje jsou také hodnoty pro doby opakování $N = 200$ a 500 let, stejně jako teoretická povodňová vlna (TPV) s dobou opakování $N \leq 500$ let, které se mohou poskytnout v libovolném profilu v síti vodních toků. Standardní hydrologické údaje zpracovává nebo ověřuje odborně způsobilá právnická osoba pověřená

ústředním orgánem státní správy v dané oblasti. Touto činností je Ministerstvem životního prostředí pověřen Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Nejmenší plocha povodí vodního toku, pro kterou lze standardní údaje poskytnout, je obvykle 0,1 km², ale konkrétní případ posuzuje zpracovatel. Doba platnosti standardních hydrologických údajů od jejich vydání nebo posledního ověření je zpravidla 5 let. Nestandardní hydrologické údaje a hydrologické studie mohou být zpracovány také jinými odbornými pracovišti. Standardní i nestandardní hydrologické údaje, pokud je zpracovává ČHMÚ, jsou zpracovány podle interních metodik, částečně uvedených i v této metodice.

V hydrologické praxi ČHMÚ se pro ověření standardních i nestandardních hydrologických údajů a odvození teoretických povodňových vln na malých povodích využívá volně dostupný srážko-odtokový událostní model HEC-HMS s využitím metody SCS-CN. Program umožňuje řešení odtokové ztráty v několika variantách a pro transformaci odtoku z povodí využití metody jednotkového hydrogramu. Vstup srážek lze rovněž řešit několika způsoby. Postup aplikace modelu HEC-HMS při odvození teoretické povodňové vlny je možné popsat těmito kroky:

- sestavení hydrologického modelu,
- stanovení fyzicko-geografických charakteristik povodí (z DEM),
- stanovení plošné N-leté srážky,
- stanovení návrhového hyetogramu (rozložení plošné N-leté srážky do kratších intervalů),
- stanovení parametrů výpočtu přímého odtoku (odtokových ztrát),
- stanovení parametrů jednotkového hydrogramu,
- stanovení základního odtoku (volitelně),
- stanovení parametrů pro postup vlny v říčním korytě (dle konkrétních podmínek),
- vlastní výpočet a interpretace výsledků.

2.2.2 Komentář k vybraným modelům používaným v ČR využívajících metodu SCS – CN

HEC-HMS

Otevřené prostředí HEC-HMS umožňuje využití širšího množství modelů, než je popsáno v kapitole 2.2.1. Pro navrhování opatření je v prostředí programu možné využít kombinaci nástrojů SCS-CN pro výpočet objemu přímého odtoku v kombinaci s SCS případně Clarkovým hydrogramem popsaným výše. HEC-HMS umožňuje mimo jiné i modelovat odtok z tání sněhu, simulovat průchod povodňové vlny nádrží a omezeně i transformaci povodňové vlny v korytě. Samotný systém HEC-HMS je podrobněji popsán v manuálech společnosti US Army Corps of Engineers, která systém vyvíjí (USACE 2021, 2022). Hlavní předností modelu je možnost kompozice řešeného povodí z menších celků, pro které se zadávají parametry.

Atlas HYDROLOGIE

Model Atlas HYDROLOGIE je plně integrován do prostředí Atlas DMT. Jedná se o nadstavbový modul, při jehož využití má uživatel k dispozici všechny nástroje programu Atlas pro práci s modelem terénu, editace i tvorbu tiskových sestav. Při využití tohoto modulu jsou uživatelům k dispozici nástroje pro generování plochy povodí ke zvolenému uzávěrovému profilu, automatizovaný import dat, editaci a optimalizaci návrhů opatření, export výstupů přímo do tiskových sestav a nástroj pro orientační dimenzování vybraného opatření. V modulu je plně integrována metoda SCS-CN a transformace povodňové vlny je pomocí SCS hydrogramu. Popis výpočtu je popsán v manuálu uvedeném na stránkách výrobce. Model je průběžně aktualizován a lze předpokládat, že v navazujících verzích bude aplikován přístup uvedený v této metodice.

DesQ-Max-Q

Komerční software DesQ-MaxQ je jednoduchý nástroj pro odvození objemu odtoku metodou CN a průběhu odtoku metodou jednotkového hydrogramu. Kvůli podstatě metody CN tento nástroj průběh příčinné srážky při výpočtu objemu odtoku. Z hlediska určení kulminačního průtoku má jistá omezení. Úhrn návrhové srážky odvozuje metodou redukce uživatelem zadaných

24hodinových maximálních úhrnů na zvolenou dobu trvání. Zadání tvaru návrhového hyetogramu ale DesQ-MaxQ neumožňuje, a protože tak uvažuje intenzitu příčinné srážky za konstantní, není možné pomocí tohoto modelu věrně simulovat odezvy na časově proměnlivé srážky.

2.2.3 Fyzikálně založené modely

Vedle metody SCS-CN jsou pro navrhování opatření v krajině využívány fyzikálně založené – procesní modely. Většina aplikačních epizodních procesně založených modelů popisuje pouze vybrané procesy, základ tvoří bilanční vztahy a rovnice popisu proudění. Povrchový odtok vzniká zpravidla bilancí vody na povrchu půdy, do které jsou uvažovány procesy infiltrace, retence a intercepce. Výpar a transpirace se vzhledem k časovému měřítku srážko-odtokové epizody zanedbává. Popis proudění vody po povrchu terénu je nejčastěji zjednodušen a popsán ve formě kinematické, výjimečně difuzní vlny. Některé modely oddělují proces povrchového odtoku v plošné podobě a soustředěné v rýhách. Odtok sítí vodních toků je řešen samostatně. Rychlá složka proudění vody pod povrchem, která je také součástí přímého odtoku, nebývá v procesně založených modelech integrována pro svou výpočetní složitost a datovou náročnost.

Oproti fyzikálně založeným modelům empirické metody jako je SCS-CN určují objem přímého odtoku bez ohledu na to, z jakých složek se skládá a jak vzniká. Zahrnují jak povrchový odtok, tak procesy v půdě (rychlý podpovrchový odtok, transport vody preferenčním prouděním atp.) a nijak tedy neřeší dynamiku a souhru těchto procesů. Fyzikálně založené modely by měly minimálně zahrnovat procesy související s bilancí vody na půdním povrchu:

- časový průběh srážky,
- časový průběh infiltrace např. Philip (1957), Green-Ampt (1911), případně složitější metody – Richards (1931),
- retence vody na půdním povrchu,
- intercepce a zachycení vody na vegetaci.

Další výpočetní rutiny fyzikálně založených modelů popisují pohyb vody po povrchu a tvorbu odtokové odezvy v závěrovém profilu:

- bilance vody na povrchu a tvorba odtoku probíhá paralelně v pravidelné (rastrové) nebo nepravidelné (TIN) síti s vazbou mezi jednotlivými elementy,
- popis proudění – nejčastěji kinematická/dynamická vlna pro plošný a soustředěný odtok, jako klíčový parametr je požadována hydraulická drsnost povrchu,
- vstup plošného odtoku do říční sítě a následná (trans)formace odtokové vlny v korytě toku může být řešena v různé úrovni složitosti a propojení s prouděním v údolní nivě či podzemní vodou od jednoduchého posunu do závěrového profilu až po korektní hydraulické řešení 1D proudění v korytě a potenciální rozliv při naplnění kapacity koryta.

Modely splňující tato kritéria je možné úspěšně využít pro navrhování/posuzování prvků v ploše povodí (záchytné a odváděcí prvky). Využití modelů pro návrh či posouzení proudění ve vodních tocích (např. návrh revitalizace koryta) je limitováno právě stupněm složitosti popisu procesů, které tvoří odtok.

Výhodou fyzikálně založených modelů je detailnější popis procesů, a tedy možnost zohlednění specifických podmínek či změn v modelovaném prostředí. Příkladem může být zohlednění realističtějšího směřování odtoku a možnost hodnotit vliv opatření modelem. Druhým příkladem může být počáteční nasycení, které je v procesních modelech definováno v počátečních podmínkách použité infiltrační rutiny prakticky libovolně spojitě. Oproti tomu standardní podoba metody CN definuje jen tři diskrétní stavy CN1, CN2 a CN3, přičemž oba krajní počáteční stavy zpravidla přináší extrémně odlišné výsledky a volba počátečních podmínek je zde zásadním zdrojem nejistot. Vstupní datová základna pro procesně založené modely je v současnosti již dostatečná z hlediska dostupnosti i potřebného prostorového rozlišení.

Je nad rámec této metodiky detailně popisovat jednotlivé modely a principy řešení, ty jsou uvedeny v příslušných manuálech. Dále uvedené modely patří mezi ty jednodušší, které jsou

v českém prostředí relativně více rozšířené např. oproti komplexnějším produktům a pro které jsou vstupní data ověřena.

SMODERP 2D

Procesně založený srážko-odtokový model je přímo zacílen na navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině. Výsledky epizodního modelu lze využít k získání příslušných hydrologických návrhových parametrů jako je objem, kulminace a průběh návrhové odtokové vlny. V modelu jsou zahrnuty procesy infiltrace (Philipova rovnice) i povrchové retence. Model se v podobě profilové verze (1D) objevuje v předcházejících metodikách, např. (Janeček 2012; Kadlec a kol. 2014). Profilová verze modelu je dostupná na stránkách Katedry hydromeliorací a krajinného inženýrství, Fakulty stavební, ČVUT v Praze (smoderp.fsv.cvut.cz) a její vývoj byl již ukončen. Nahrazen byl verzí s 2D prostorově distribuovaným řešením, v níž jsou kromě plošného odtoku zahrnuty procesy soustředěného odtoku v rýhách a zjednodušený odtok ve vodních tocích.

Nově vyvíjená verze modelu SMODERP ve formě 2D je koncipována tak, aby bylo možné efektivně využít běžně dostupná data o půdě, vegetaci a morfologii (viz kapitola 2.4). Doporučené střední hodnoty jednotlivých parametrů jsou součástí manuálu k modelu.

Erosion 3D

Fyzikálně založený Erosion 3D (von Werner, 2006) je epizodní distribuovaný model srážko-odtokových vztahů, erozních a transportních procesů, který byl primárně vytvořen pro prostředí německého Saska. Tento model je zaměřen především na erozní problematiku, ale lze jej použít i pro výpočet množství protékající vody v každém výpočetním elementu zvolené oblasti. Obtížnost nasazení modelu pro podmínky v ČR spočívá především v určení vlastností půd. Katalogové parametry vycházejí ze standardu KA4 (AG BODEN 1994) a jsou odvozeny a kalibrovány na území Saska. Parametry modelu byly v letech 2018–2021 kalibrovány pro podmínky ČR. Praktické nasazení a využití modelu, včetně přehledu vstupních dat a jejich dostupnosti uvádí Beitlerová (2021).

Výstup z modelu tvoří soubor rastrových vrstev pro jednotlivé výstupní veličiny, mimo jiné i objem odtoku a průtok. Tyto vrstvy je možné ukládat pro každý časový krok simulace. V případě použití dodatečného modulu pro sledování odtoku je možné definovat profily (buňky rastru), z nichž jsou hodnoty výstupních veličin ukládány jako časové řady v tabelované podobě.

Soustředěný povrchový odtok je simulován odděleně od plošného povrchového odtoku, tím je umožněno sledovat průtok například v korytě vodního toku. Geometrie koryta a jeho další hydraulické vlastnosti však nejsou, stejně jako v případě modelu SMODERP2D, do modelu přímo zadávány a řešení této komponenty je pouze zjednodušené. Pohyb vody po povrchu je simulován modelem kinematické vlny.

2.3 Návrhové srážky na území ČR

Klíčovými údaji pro hydrologické modelování jsou úhrn srážek, jejich rozložení v čase a aktuální stav povodí z hlediska jeho nasycenosti. Velikost a tvar hydrogramu jsou výsledkem komplexního působení celé řady faktorů, takže obecně není možné předpokládat, že zátěžový návrhový úhrn srážek určité doby opakování vyvolá odtok o stejné době opakování, mj. kvůli podstatnému vlivu předchozí nasycenosti. Pro nepozorované profily a opatření navrhovaná v ploše povodí je však právě modelování odezvy na srážky s určitou dobou opakování pro potřeby běžné inženýrské praxe prakticky jediným použitelným řešením.

Uvažované krátkodobé (subdenní) srážky jsou charakteristické svojí prostorovou i časovou proměnlivostí. Území ČR není homogenní ani z hlediska statistického rozdělení úhrnů srážek, ani z hlediska rozmanitosti časových průběhů srážkových intenzit, s níž souvisí i míra předchozí nasycenosti. Metodika proto společně hodnotí tři odvozené charakteristiky návrhových srážek: (i) jejich velikost (kap. 2.3.1), (ii) pravděpodobnost scénářů časového průběhu jejich intenzity

(kap. 2.3.2) a (iii) stav předchozí nasycenosti ve vztahu k příslušnému scénáři (kap. 2.3.3). Hodnocení se zaměřuje na popis prostorové proměnlivosti těchto charakteristik v závislosti na uvažované době opakování úhrnu. Součástí hodnocení by měl být také odhad nejistoty v hodnotách pro danou lokalitu s ohledem na omezenou délku při odvození použitých datových řad a obecně velkou prostorovou proměnlivost srážek.

Odvození charakteristik návrhových srážek bylo provedeno na základě tzv. adjustovaných radarových dat a staničních měření s využitím progresivních metod regionální frekvenční analýzy (pro podrobný popis viz kap. 3.1). Časové rozlišení adjustovaných radarových dat s krokem 10 min v pevných časových oknech umožňuje odhadnout velikost návrhových úhrnů v celé škále časových úseků, s minimální doporučenou plovoucí délkou 30 min. V rámci takového úseku je možné dále popsat průběh srážkové intenzity a stanovit i míru nasycenosti na jeho začátku. Vytvořená metodika využívá časové úseky o délce šest hodin, která se v rámci předešlé metodiky (Kavka a kol., 2018) ukázala být nejvhodnější pro konstrukci syntetických hyetogramů postihujících variabilitu průběhů srážkových intenzit pro silné srážky na území ČR (kap. 3.1.5). Uvažování šestihodinových úseků je kompromisem mezi 24-hodinovými úseky, které jsou z hlediska určení vlivu časové koncentrace srážek na hydrologickou odezvu v malém povodí příliš dlouhé, a maximálními intenzitami dešťů o délce trvání hodinu a méně, které zpravidla nezahrnují celou příčinnou srážkovou událost a neumožňují zachytit možné významnější změny v intenzitě srážek. Návrhová srážka o délce šest hodin popisuje variabilitu příčinných srážek ovlivňujících odtoky z malých povodí.

2.3.1 Velikost návrhových šestihodinových intenzit deště

Korektní odhad návrhového úhrnu srážek s určitou dobou opakování je úloha vyžadující frekvenční analýzu dostatečně dlouhých srážkových řad, pro krátkodobé srážky navíc s velmi podrobným časovým a s ohledem na jejich prostorovou proměnlivost i prostorovým rozlišením. Pro odvození návrhových úhrnů v rámci této metodiky byl proto využit synergický přístup kombinující přímo naměřená srážková data a data odvozená z měření meteorologickými radary. Srážková data odvozená z radarových měření byla před použitím navíc zpřesněna adjustací denními úhrny ze sítě srážkoměrných stanic (dále jen adjustovaná radarová data). Podrobný popis použité datové základny a aplikovaných metod frekvenční analýzy pro odhad velikosti návrhových úhrnů je uveden v kapitolách 3.1.1 až 3.1.4.

Odhady velikosti návrhových šestihodinových úhrnů srážek s dobou opakování 2, 5, 10, 20, 50 a 100 let jsou uvedeny v příloze 8.2 a pro povodí IV. řádu jsou dostupné na portálu rain.fsv.cvut.cz. Průměry z celého území ČR dosahují pro tyto doby opakování hodnot 29, 39, 46, 53, 64 a 73 mm. Z prezentovaných mapových výstupů je nicméně zřejmá prostorová nerovnoměrnost návrhových úhrnů. Určitou roli v jejich distribuci hraje nadmořská výška, takže v polohách do 300 m n. m. dosahují návrhové úhrny v průměru 28 mm pro dobu opakování 2 roky, resp. 68 mm pro dobu opakování 100 roků. V horských polohách s nadmořskou výškou nad 900 m n. m. tyto hodnoty dosahují v průměru 32, resp. 85 mm. Patrný je také zonální gradient, přičemž v severozápadní části státu jsou s výjimkou hor a jim přilehlých území návrhové úhrny obecně menší.

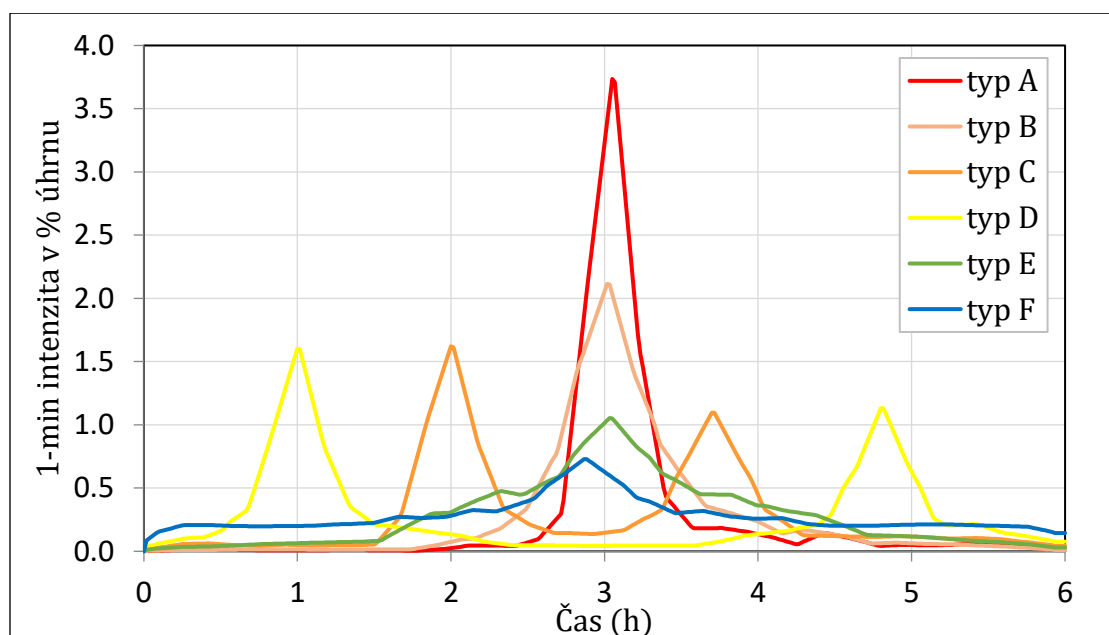
Ačkoliv byly odhady provedeny robustní metodou regionální frekvenční analýzy, je třeba při jejich interpretaci počítat s určitou nejistotou. To platí především pro vyšší doby opakování, pro které může být velikost návrhových úhrnů lokálně ovlivněna případným výskytem ojedinělé srážkové události s mimořádně vysokým úhrnem, jehož skutečná doba opakování výrazně překračuje délku období, z něhož jsou k dispozici data. Možnost lokálního nadhodnocení odhadu lze připustit v prostorově omezených oblastech, které se z hlediska fyzicko-geografických podmínek významně neliší od svého okolí, kde jsou odhadovány menší návrhové úhrny. Naopak v horách a v jejich blízkosti jsou případné zvýšené hodnoty velmi pravděpodobně podmíněny různými mechanismy orografického zesilování srážek.

2.3.2 Časový průběh návrhových srážek

Časový průběh srážkových intenzit během případů silných srážek zásadně ovlivňuje hydrologickou odezvu. Rozmanitost průběhů je natolik velká, že jejich aproximace jediným syntetickým hyetogramem by byla velmi zjednodušující. Předkládaná metodika přebírá řešení navržené v rámci předchozí metodiky (Kavka a kol., 2018), a to ve formě odhadu zastoupení šesti scénářů průběhu srážkové intenzity. Každý z nich je reprezentován jedním šestihodinovým syntetickým hyetogramem (Obrázek 1), znázorňujícím relativní podíl množství srážek v jednotlivých minutách vůči šestihodinovému úhrnu, což umožňuje aplikovat ho na srážku o libovolném úhrnu. Další výhodou těchto hyetogramů je, že dostatečně postihují srážkové události i s kratší dobou trvání, než je zvolených šest hodin, což zásadně redukuje případné nedostatky aplikovaného přístupu k hodnocení návrhových srážek pouze pro jednu délku trvání. Tvary hyetogramů jsou označeny písmeny A až F. Čtveřice tvarů A, B, E a F má jednoduchý průběh. Tvar A reprezentuje epizody nejvíce koncentrované v čase, odpovídající zpravidla přívalovým srážkám. Naopak tvar F reprezentuje nejméně koncentrované epizody odpovídající spíše trvalým srážkám s rovnoměrnou intenzitou. V souladu s pozorováními byly odvozeny i tvary C a D, které se vyznačují dvěma vrcholy s různě dlouhým poklesem srážkové intenzity či dokonce přestávkou mezi nimi. Pro účely této metodiky byla pro každý 1×1 km pixel nově odhadnuta procentuální zastoupení hyetogramů, a to zvlášť pro jednotlivé uvažované doby opakování šestihodinových úhrnů srážek. Podrobný popis aplikovaných metod je uveden v kapitole 3.1.5.

Odhadovaná procentuální zastoupení šesti variant průběhu srážkové intenzity během šesti hodin pro doby opakování 2–100 let jsou znázorněna v příloze 8.3 této metodiky a jsou rovněž dostupná na portálu rain.fsv.cvut.cz. Stejně jako velikost návrhových úhrnů, ani jejich průběhy nejsou na území ČR rovnoměrně zastoupeny. Jejich zastoupení se liší jak v prostoru, tak v závislosti na době opakování návrhové srážky. Obecně platí, že s rostoucí dobou opakování návrhového úhrnu dochází k větší koncentraci vysokých hodnot zastoupení ve specifických oblastech. S ohledem na těsnou vazbu mezi velikostí návrhového úhrnu a zastoupením tvarů je zřejmé, že i prostorová distribuce zastoupení je ovlivněna topografií místa, zejména nadmořskou výškou. Závislost na topografii se však může pro jednotlivé průběhy srážek lišit vlivem rozdílných příčinných cirkulačních podmínek vzniku silných srážek. V případě nízkých dob opakování jsou procentuální zastoupení jednotlivých variant plošně poměrně rovnoměrná, ovšem s výjimkou horských oblastí, především na severních úbočích pohraničních hor, kde je výrazně zvýšené zastoupení rovnoměrných srážek na úkor krátkodobých epizod. Tento kontrast dále narůstá s rostoucí uvažovanou dobou opakování srážky.

Na základě prezentovaných výsledků doporučujeme provádět v dané lokalitě návrhy vodohospodářských opatření pro danou velikost návrhového šestihodinového úhrnu srážek v šesti variantách jejich průběhu, vyjádřených šesticí syntetických hyetogramů. Parametry očekávané hydrologické odezvy jsou pak odvozeny jako vážený průměr parametrů odezev na srážky uspořádané do jednotlivých hyetogramů, přičemž jako váhy slouží procentuální zastoupení daného scénáře průběhu srážky. Je nicméně třeba počítat s tím, že i odhad pravděpodobnosti průběhů návrhové srážky, vyjádřený procentuálním zastoupením syntetických hyetogramů, je zatížen neurčitostí, která pramení z relativně malé délky časových řad. Z tohoto důvodu je v oblastech bez výrazných fyzicko-geografických gradientů vhodné přihlídnout k hodnotám zastoupení hyetogramů v širším okolí daného místa.



Obrázek 1: Šestice syntetických hyetogramů vyjadřující variabilitu průběhu šestihodinových srážek (Tabulka tvarů šestihodinových srážek je uvedena v příloze 8.1)

2.3.3 Předpokládaná nasycenost povodí před návrhovými srážkami

Hydrologickou odezvu kromě intenzity a průběhu srážky zásadně ovlivňuje také počáteční nasycenost povodí. Základním faktorem, který ji určuje, je množství předchozích srážek. Při náhodném výběru šestihodinového časového úseku lze předpokládat průměrnou nasycenost, pro případy silných srážek je však tento předpoklad příliš zjednodušující vzhledem k autokorelaci srážkových úhrnů. Pro různé průběhy návrhové srážky předpokládáme různou míru nasycenosti, proto je hodnocena zvláště pro každý ze šesti variant průběhu návrhové srážky. K vyjádření nasycenosti používáme ukazatel předchozích srážek za pět dní (API_5) stanovený podle vztahu:

$$API_5 = \sum_{n=1}^5 R_n \cdot 0,93^n \quad (11)$$

kde R_n značí 24-hodinový úhrn srážek za období začínající n dní před začátkem šestihodinového úseku s extrémním úhrnem.

Nasycenost je v každém místě uvažována relativně k průměrné hodnotě v daném místě a dané fázi roku, protože závisí na klimatologii srážek včetně jejich ročního chodu. Stanovena je pravděpodobnost abnormální předchozí nasycenosti před jednotlivými variantami průběhu srážky, popsány šesti syntetickými hyetogramy, a to bez ohledu na dobu opakování srážkového úhrnu. Způsob určení této pravděpodobnosti je podrobněji popsán v kapitole 3.1.6.

Pravděpodobnosti, že vysoký šestihodinový úhrn srážek s daným průběhem spadne do abnormálně nasyceného povodí, jsou prezentovány společně s pravděpodobným výskytem tvaru srážky v příloze 8.3 této metodiky a jsou rovněž dostupné na portálu rain.fsv.cvut.cz. Jednotlivé varianty průběhu návrhových srážek se z hlediska této pravděpodobnosti značně liší. Pro varianty srážek koncentrovaných do jednoho krátkého časového úseku (syntetické hyetogramy A a B) jsou tyto pravděpodobnosti na většině území nižší než 20 %. Naopak silné srážky rozložené vcelku rovnoměrně do celého šestihodinového úseku (typ F) se vyznačují zvýšenou pravděpodobností abnormální předchozí nasycenosti, což zřejmě souvisí s tím, že tyto srážkové události zpravidla trvají déle než šest hodin, někdy dokonce až několik dní. V rozsáhlé části území ČR dosahuje pravděpodobnost abnormální předchozí nasycenosti kolem 50 %, a to především na horách a v jejich blízkosti.

Při navrhování vodohospodářských úprav je tedy třeba počítat s tím, že návrhový šestihodinový úhrn srážek v určitém místě může mít různý průběh, vyjádřený pravděpodobností šesti variant popsaných jednotlivými syntetickými hyetogramy, navíc však s určitou pravděpodobností abnormální předchozí nasycenosti pro každou variantu. Každý ze šesti scénářů podle průběhu srážky lze tedy rozdělit do dvou podtypů (s normální, resp. abnormální nasyceností), přičemž zastoupení každého z nich lze vyjádřit pomocí kombinované pravděpodobnosti. Přitom je opět třeba počítat s nejistotou, která pramení z krátkých časových řad, takže je vhodné přihlídnout k zastoupení podtypů v širším okolí daného místa. Zvláštní zřetel je třeba brát na horské oblasti a jejich předpolí, kde byla detekována vysoká pravděpodobnost rovnoměrnějších srážek současně s vysokou pravděpodobností abnormální předchozí nasycenosti.

2.4 Ostatní vstupní prostorová data nutná pro hydrologické modelování

Cílem této metodiky je primárně vytvořit návod pro odvození modelových scénářů srážek, jejich tvarů a jím odpovídajícím počátečním stavům z hlediska nasycenosti. Pro vlastní modelování jsou také důležitá další vstupní data. Většina datových zdrojů jsou geoprostorová data. Především se jedná o morfologická data, data o povrchu – využití území a půdních vlastnostech.

Morfologie

Data o morfologii jako je nadmořská výška, sklon, akumulace atp. vychází z výškopisu, který je v dostatečné podrobnosti rozlišení poskytován ČÚZK. Jedná se o DMR4G v rozlišení od pět metrů a DMR5G v rozlišení 2 m. Detailní popis dat uvádí ČÚZK.

Využití území

Pro území ČR jsou dostupné zdroje o využití území ve vektorové podobě v dostatečném rozlišení součástí ZABAGED. Nově jsou součástí ZABAGED kategorizované lesní porosty. Nevýhodou zůstává kategorie „Orná půda a ostatní dále nespecifikované plochy“. Pro zemědělskou půdu je pak zpřesněním veřejná část databáze Veřejný registr půdy LPIS, která obsahuje geometrii využívaných zemědělských ploch. Kombinací těchto dvou vrstev je možné odvodit charakteristiky povrchu jak pro metodu CN, tak pro fyzikálně založené modely. Dalšími možnostmi s nižší přesností jsou rastrová data CORINE LandCover. Součástí návrhu opatření by měl být provedený terénní průzkum při kterém je možné plochy dále kategorizovat. A doplnit nemapované prvky případně rozšíření nebo zmenšení hodnoceného území z důvodů přítomnosti odváděcích prvků v ploše povodí. Může se jednat o příkopy a průlehy vybudované v ploše povodí z důvodů protierozní ochrany. Dále upřesnit množství zpevněných ploch, které zásadně ovlivňují odtokovou odezvu zejména z návrhových dešťů o nižších intenzitách. Ke zpřesnění je možné využít další zdroje dat ve větší podrobnosti, například pomocí bezpilotních prostředků – UAV.

Půdní data

Vlastnosti půdy ovlivňují hydrologickou bilanci zejména infiltrací. Infiltrace do půdy je složitý proces, který je ovlivněn celou řadou podmínek. Zásadní vliv má půdní textura – zrnitostní složení, obsah organické hmoty a hustota. Mimo tyto fyzikálně popsatelné charakteristiky také pedogeneze. Důležitým parametrem je pak aktuální stav půdy z hlediska vlhkosti.

Nejpřesnější metodou získání charakteristik půdy je pedologický průzkum a odvození charakteristik půdy v terénu nebo z odebraných vzorků. Určitým zjednodušením jsou pak odvozené mapy. Pro metodu CN jsou přímo odvozeny mapy hydrologických skupin půd – HSP (Strouhal a kol. 2021; Vopravil 2018), které jsou rozděleny do čtyřech skupin podle rychlosti infiltrace:

- Skupina A: Půdy s vysokou rychlostí infiltrace ($> 0,20$ mm/min) i při úplném nasycení, zahrnující převážně hluboké, dobře až nadměrně odvodněné písky a štěrky.
- Skupina B: Půdy se střední rychlostí infiltrace ($0,10 - 0,20$ mm/min) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy středně hluboké až hluboké, středně až dobře odvodněné, hlinitopísčité až jílovitohlinité.
- Skupina C: Půdy s nízkou rychlostí infiltrace ($0,05 - 0,10$ mm/min) i při úplném nasycení, zahrnující převážně půdy s málo propustnou vrstvou v půdním profilu a půdy jílovitohlinité až jílovité.
- Skupina D: Půdy s velmi nízkou rychlostí infiltrace ($< 0,05$ mm/min) i při úplném nasycení, zahrnující převážně jíly s vysokou bobtnavostí, půdy s trvale vysokou hladinou podzemní vody, půdy s vrstvou jílu na povrchu nebo těsně pod ním a mělké půdy nad téměř nepropustným podložím.

Pro fyzikální modely je možné odvodit infiltrační charakteristiky na základě pedotransferových funkcí na základě půdní textury. Mapy HSP a texturních vlastností (Beitlerová a kol. 2021) je dostupná na rain.fsv.cvut.cz a vumop.cz.

Tabulka 5: Přibližné hodnoty makroskopických fyzikálních charakteristik pro jednotlivé půdní druhy

Půdní druh (Novák)	Půdní druh (USDA)	Reziduální objemová vlhkost	Nasycená objemová vlhkost	Vodní kapacita	Polní kapacita	Volná kapacita	Nasycená hydraul. vodivost
		(cm ³ ·cm ⁻³)					(cm·d ⁻¹)
Jílovitá / Jíl	Jíl	0,098	0,459	0,361	0,347	0,112	14,8
	Písčitý jíl	0,079	0,442	0,363	0,27	0,172	8,2
Hlinitá	Hlína	0,061	0,399	0,338	0,165	0,234	12,1
Písčitá	Hlinitý písek	0,049	0,39	0,341	0,06	0,33	105,2
	Písek	0,053	0,375	0,322	0,046	0,329	642,7
Jílovito-hlinitá	Hlinitý jíl	0,117	0,385	0,268	0,267	0,118	11,4
Písčito-hlinitá	Písčitá jíl. hlína	0,063	0,384	0,321	0,169	0,215	13,2
Hlinito-písčitá	Písčitá hlína	0,039	0,387	0,348	0,085	0,302	38,3
	Prach	0,05	0,489	0,439	0,258	0,231	43,8
	Prach. jíl	0,111	0,481	0,37	0,337	0,144	9,6
	Prach. jíl. hlína	0,09	0,482	0,392	0,338	0,144	11,1
	Prach. hlína	0,065	0,439	0,374	0,24	0,199	18,2

2.5 Návrh svodných a odváděcích prvků v ploše povodí

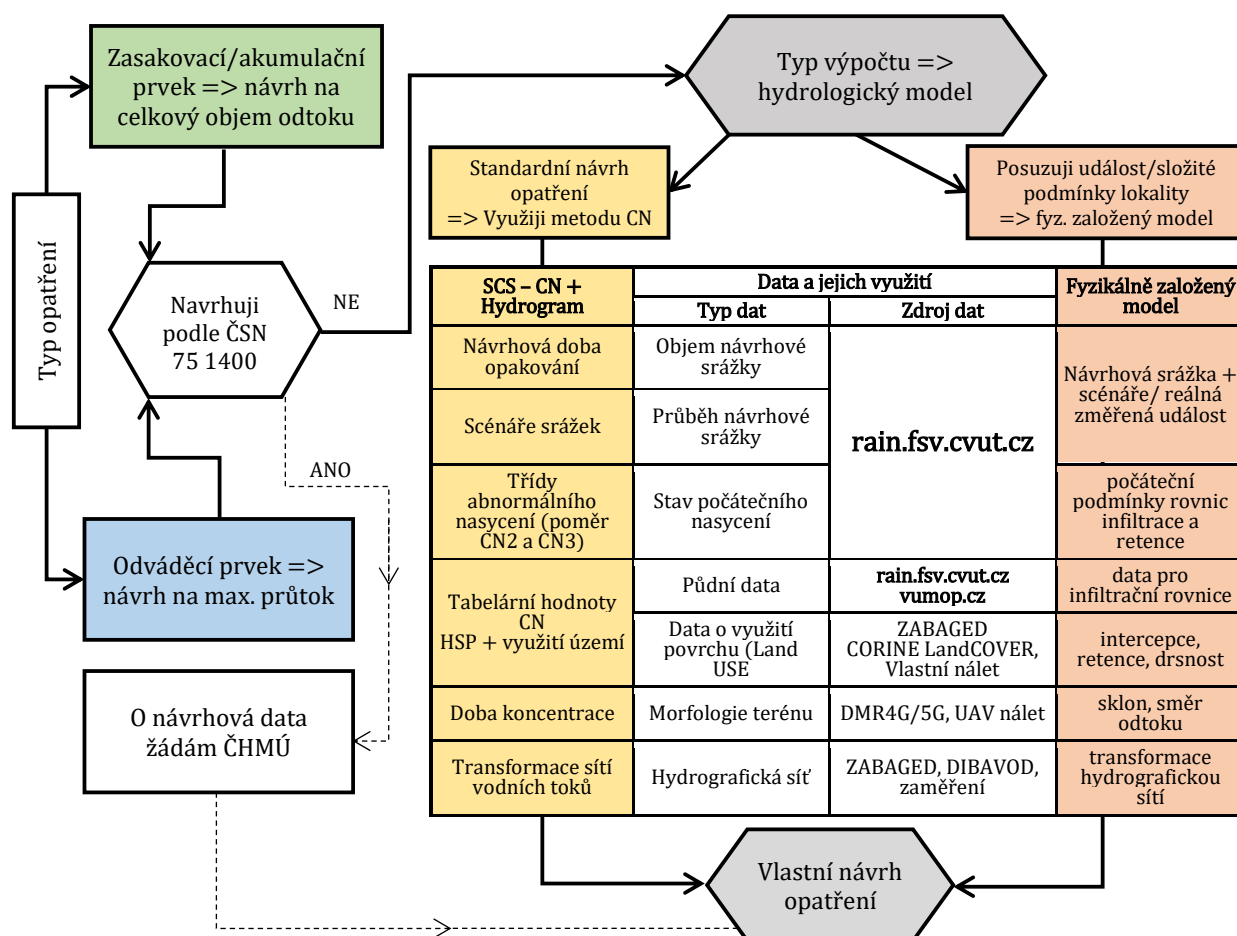
Navrhování vodohospodářských opatření v ploše povodí a drobných vodních tocích je s ohledem na značnou variabilitu v objemu a průběhu přívalových srážek a nejistotu počátečních podmínek obtížné postihnout jedním návrhovým stavem. Snížení uvedených nejistot je možné dosáhnout simulací skupiny scénářů a odvodit návrhové hodnoty objemu a průtoku podle jejich zastoupení. Uvažované scénáře vycházejí z obsahu kapitoly 2.3 – „Návrhové srážky na území ČR“. Na základě dvacetileté řady adjustovaných radarových dat a na základě více než třicetiletých staničních srážkových dat byly pro území ČR odvozeny tři charakteristiky návrhového deště:

- úhrn šestihodinových srážek pro doby opakování 2, 5, 10, 20, 50 a 100 let,
- zastoupení syntetických hyetogramů vyjadřujících variabilitu průběhu srážek pro jednotlivé doby opakování,
- pravděpodobnost abnormální předchozí nasycenosti (qAPI) pro jednotlivé hyetogramy vztažená k normálu nasycenosti.

Tato data jsou odvozena v prostorovém rozlišení 1x1 km, pro celé území ČR a jsou dostupná pomocí online služeb na portálu rain.fsv.cvut.cz, kde jsou zpřístupněny webprocessingové služby dostupné uživateli z prostředí open GIS software QGIS. Na tomto portálu je také provozován SW HydroRAIN, který využívá webprocessingových služeb pro poskytování dat srážek pro povodí IV. řádu (HydroRAIN_6h) a pro výpočet objemu odtoku pomocí metody SCS-CN (HydroRAIN_CN) bez nutnosti využití specializovaného SW.

Metodický postup využití tohoto souboru dat pro navrhování vodohospodářských opatření v ploše povodí a stavby na drobných vodních tocích se liší podle využití metody v následujících čtyřech krocích, které jsou také znázorněny na následujícím schématu.

Schéma 1: Schéma návrhu/posouzení prvků v ploše povodí



Výběr scénářů

Pro zvolenou dobu opakování a konkrétní polohu řešené lokality na území ČR uživatel získá úhrn šestihodinové návrhové srážky. Zároveň pro toto místo získá zastoupení tvarů srážek včetně pravděpodobnosti abnormální předchozí nasycenosti – q_{API} . Pro metodu SCS-CN v kombinaci s jednotkovým hydrogramem je hodnota q_{API} interpretována jako poměr mezi zastoupením CN2 a CN3, viz následující tabulka (Tabulka 6).

Tabulka 6: Váhy zastoupení scénářů předchozího nasycení v metodě CN podle pravděpodobnosti výskytu abnormální nasycenosti

Pravděpodobnost abnormální nasycenosti*	< 0,2	0,2 – 0,4	0,4 – 0,6	0,6 – 0,8	> 0,80
CN2	1,0	0,75	0,50	0,25	0
CN3	0	0,25	0,5	0,75	1,0

* Pro ČR uvedeno na mapách v příloze 8.3

Hodnota CN1, která odpovídá podprůměrnému předchozímu nasycení se na území ČR vyskytuje výrazně méně a pro návrh opatření se využití tohoto stavu nedoporučuje. Např. při extrémně dlouhodobém suchu může zejména na hospodářsky využívaných pozemcích sucho způsobit krustaci povrchu a snížení infiltrační kapacity, což může vést ke značně vyšším odtokům oproti predikci modelu.

V případě využití fyzikálně založených modelů, ve kterých je obsažena infiltrační rutina (např. Phillip, Green-Ampt, Richardsova rovnice), je mimo hydraulických charakteristik půdy nutné definovat i počáteční nasycení půdních vrstev, zejména povrchu. Určitým vodítkem mohou být stavy půdní vlhkosti odpovídající různým hydrolimitům. Za suchý stav odpovídající běžné hodnotě API lze považovat bod snížené dostupnosti. Za vlhký stav hodnoty polní kapacity, ta odpovídá poměrně vlhkému půdnímu prostředí, která typicky nastává přibližně 2 až 3 dny po předchozí extrémní srážkové události (objemová vlhkost při sacím tlaku 33 kPa, ČSN EN ISO 11274). Za zcela vlhký stav je považováno plné nasycení půdního profilu po předchozích srážkách nebo při modelování výseku déle trvajících dešťů.

Vyčíslení scénářů

Druhým krokem je výpočet sady všech relevantních modelových scénářů s požadovanou periodicitou příčinné srážky, průběhu intenzit příčinné srážky a relativní četnosti výskytu tohoto průběhu v kombinaci s pravděpodobným předchozím stavem nasycení. Z dílčích odezví těchto scénářů je následně spočtena výsledná odtoková odezva s požadovaným návrhovým objemem či kulminačním průtokem.

V případě metody SCS – CN pro stavy CN2 a CN3 a charakteristiky zvoleného typu hydrogramu uživatel spočte odtokovou odezvu návrhové srážky (objem, kulminační průtok) pro jednotlivé hyetogramy.

V případě fyzikálního přístupu je vypočítána hydrologická odezva pro každý hyetogram a jemu odpovídající stav počátečního nasycení.

Výpočet návrhového průtoku a objemu odtoku

Výsledný návrhový průtok a objem odtoku je sumou všech dílčích průtoků či objemů vážených pravděpodobností výskytu příslušného průběhu příčinné srážky se zohledněním pravděpodobného počátečního nasycení. V případě metody SCS-CN se tak jedná o součet dílčích odezví na všechny návrhové hyetogramy vážený pravděpodobností výskytu příslušného hyetogramu a váhou zastoupení scénářů předchozího nasycení (CN2 a CN3) podle výše uvedené tabulky (Tabulka 6).

Tento postup je možné zjednodušit vynecháním hyetogramů, které jsou v posuzované lokalitě zastoupeny méně než v 5 %.

HydroRAIN_CN

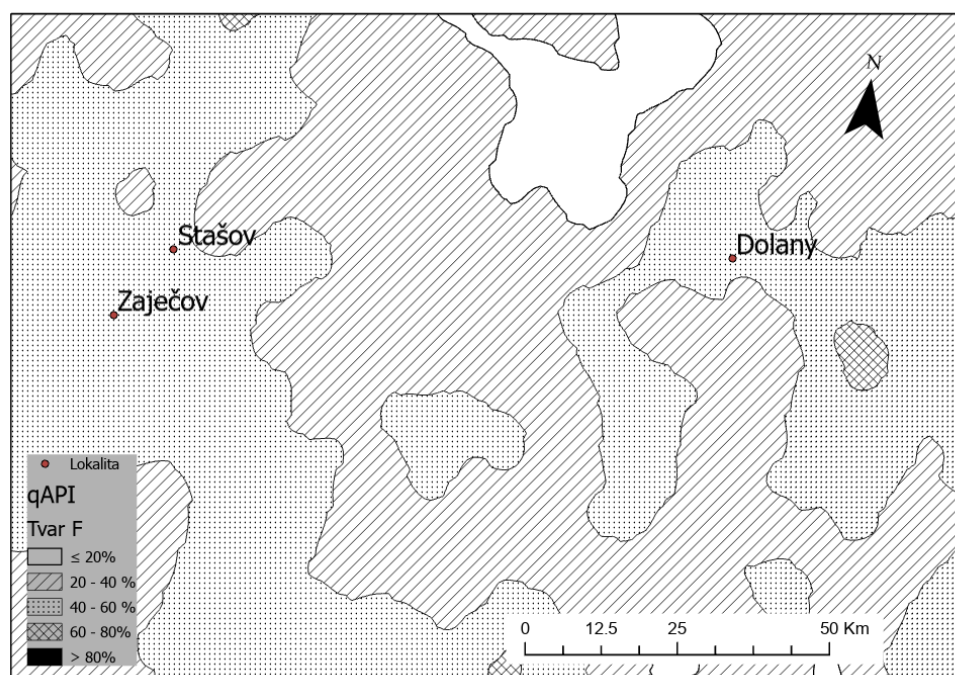
Na portálu rain.fsv.cvut.cz je provozován nástroj HydroRAIN_CN pro výpočet objemu přímého odtoku, který využívá zde popsany postup. Uživatel na mapě ČR vyhledá zájmovou lokalitu a po zadání požadované doby opakování a hodnoty CN2 mu SW služba vrátí hodnotu objemu přímého odtoku se zahrnutím zastoupení tvarů hyetogramů a qAPI.

2.6 Příklady využití

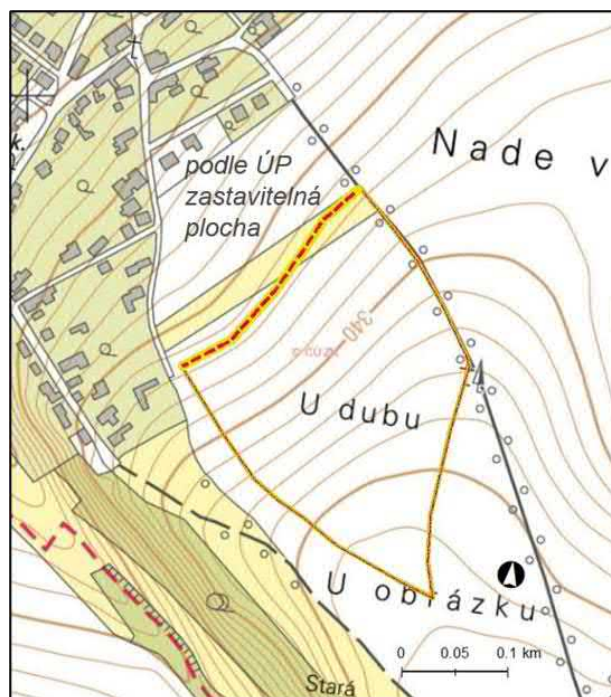
V rámci metodiky byli zpracovány tři úlohy pomocí metody SCS-CN, na kterých je demonstrována metoda návrhu opatření. První úloha (lokalita Stašov) je zaměřena na výpočet objemu zasakovacího prvku. Další dvě pak demonstrují návrh nového odváděcího příkopu (Dolany) a posouzení kapacity propustku (Zaječov). Návrhy jsou na stoletou návrhovou šestihodinovou srážku. U návrhů je dále zohledněno zastoupení tvarů hyetogramů a rozložení stupně nasycení před příčinnou srážkou (Obrázek 2).

Návrh zasakovacího průlehu

V obci Stašov je pro ochranu zástavby před přívalovými dešti uvažován zasakovací průleh nad obcí. Délka průlehu je 235 m, objem průlehu při 5 m³ na 1 m délky je 1175 m³. Plocha povodí nad průlehem činí 5,7 ha. Návrhová 6-hodinová srážka má hodnotu P100 = 60,2 mm.



Obrázek 2: Ukázka rozložení stupně nasycení – qAPI před příčinnou srážkou P100 s typem hyetogramu F



Obrázek 3: Uvažovaný zasakovací průleh nad zástavbou obce Stašov (červeně – čárkovaně) s vyznačenou sběrnou plochou (oranžová)

Podle metody čísel odtokových křivek činí při stupni nasycení CN2 (81) objem přímého odtoku V_{CN2} 1232 m³ a při stupni nasycení CN3 (91,4) činí objem přímého odtoku V_{CN3} 2207 m³. Tyto dvě hodnoty byly váženy jednak podle mapových podkladů API pro jednotlivé typy hyetogramů (pro typ A a B je v lokalitě určující varianta CN2, pro typ C, D a E je CN2 dána váha 0,75 a CN3 váha 0,25 a pro typ F je CN2 i CN3 dána váha 0,5) a dále podle podílu zastoupení jednotlivých hyetogramů v dané lokalitě (zast. P). Z vah vychází hodnota objemu V_{vaz_CNX} ($V_{vaz_CNX} = V_{CNX} * zast. CNX / 100 * zast. P / 100$). Výsledná hodnota objemu odtoku V_{vysl} se potom rovná součtu všech hodnot V_{vaz_CNX} , tj. 1343 m³. Návrh průlehu (1175 m³) tedy nepojme objem stoletého odtoku v lokalitě, je důležité zajistit přetok vody přes stabilizovanou svodnici do dešťové kanalizace.

Tabulka 7: Návrhové srážky a zastoupení typů hyetogramů A-F pro dobu opakování 100 let, stupně nasycení odvozené podle podkladů qAPI a odvozené hodnoty objemů V

Tvar hyetogramu	P (mm)	zast. P (%)	CN2	CN3	zast. CN2 (%)	zast. CN3 (%)	V_{CN2} (m ³)	V_{CN3} (m ³)	V_{vaz_CN2} (m ³)	V_{vaz_CN3} (m ³)
A	60,2	21,4	81	90,7	100	0	1232	2127	263,6	0,0
B	60,2	33,5	81	90,7	100	0	1232	2127	412,7	0,0
C	60,2	15,4	81	90,7	75	25	1232	2127	142,3	81,9
D	60,2	20,2	81	90,7	75	25	1232	2127	186,6	107,4
E	60,2	9,1	81	90,7	75	25	1232	2127	84,1	48,4
F	60,2	0,4	81	90,7	50	50	1232	2127	2,5	4,3
V_{vysl} (m³) – výsledný objem – suma objemů vážených podle zast. P a pravděpodobnosti abnormálního nasycení										1333,8

Posouzení odváděcího příkopu

V rámci komplexních pozemkových úprav v katastru Dolany u Červených Peček byla v roce 2010 realizována protierozní a vodohospodářská opatření. Mimo jiné odváděcí příkop P1 nad zástavbou. Jeho pozvolná část má tyto parametry: délka 670 m, sklon 0,8 ‰, zatravněné koryto lichoběžníkového tvaru, sklon břehů 1:1,5; šířka ve dně 0,6 m; hloubka 0,8 m. Koryto s těmito parametry zajistí bezpečné převedení $2,01 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Pro posouzení kapacity příkopu byla zvolena návrhová srážka P100 s hodnotu 60,9 mm. V tabulce 8 je dále uvedeno procentuální zastoupení šesti typů hyetogramů A-F a odvozené kulminace podle modelu HEC-HMS při dvou variantách počátečního nasycení povodí (Q_{k_CN2} a Q_{k_CN3}). Tyto hodnoty byly váženy jednak podle mapových podkladů API pro jednotlivé typy hyetogramů (pro typ A, B, C a D je v lokalitě určující varianta CN2, pro typ E je CN2 dána váha 0,75 a CN3 váha 0,25 a pro typ F je CN2 i CN3 dána váha 0,5) a dále podle podílu zastoupení jednotlivých hyetogramů v dané lokalitě (zast. P). Z těchto vážení vychází hodnoty vážených kulminací $Q_{k_vaz_CNX}$ ($Q_{k_vaz_CNX} = Q_{k_CNX} * \text{zast. CNX} / 100 * \text{zast. P} / 100$). Výsledná hodnota kulminace Q_{k_vysl} se potom rovná součtu všech hodnot $Q_{k_vaz_CNX}$, tj. $0,56 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. V porovnání s kapacitou příkopu vyplývá, že by měla tato část příkopu bez problémů převést stoletou povodňovou vlnu.



Obrázek 4: Uvažovaný odváděcí příkop nad zástavbou Dolan (červeně – čárkovaně) s vyznačenou sběrnou plochou (oranžová)

Tabulka 8: Návrhové srážky a zastoupení typů hyetogramů A-F pro dobu opakování 100 let, stupně nasycení odvozené podle podkladů qAPI a odvozené hodnoty kulminací Qk

Tvar hyetogramu	P (mm)	zast. P (%)	CN2	CN3	zast. CN2 (%)	zast. CN3 (%)	Qk_CN2 (m ³ s ⁻¹)	Qk_CN3 (m ³ s ⁻¹)	Qk_vaz_CN2 (m ³ s ⁻¹)	Qk_vaz_CN3 (m ³ s ⁻¹)
A	60,9	1,2	84,3	92,5	100	0	0,71	1,20	0,009	0,000
B	60,9	40,8	84,3	92,5	100	0	0,62	1,04	0,253	0,000
C	60,9	16,6	84,3	92,5	100	0	0,54	0,82	0,090	0,000
D	60,9	33,1	84,3	92,5	100	0	0,51	0,70	0,167	0,000
E	60,9	2,4	84,3	92,5	75	25	0,52	0,81	0,009	0,005
F	60,9	5,8	84,3	92,5	50	50	0,38	0,61	0,011	0,018
Qk_vysl (m ³ s ⁻¹) – výsledná kulminace – vážená podle zast. P a pravděpodobnosti abnormálního nasycení										0,56

Posouzení kapacity zatrubnění – propustky

V obci Zaječov v lokalitě Hamburk je vymezen tzv. kritický bod v místě zatrubnění svodnice na okraji intravilánu. Norma ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů doporučuje minimální dimenzi propustků (zatrubnění) DN 600 a to s ohledem na údržbu a čištění. Toto zatrubnění DN 1200 v lokalitě splňuje. Při sklonu 5 % vyplývá z tabulky dimenzí propustků (Tabulka 2), že má kapacitu 8,73 m³s⁻¹.



Obrázek 5: Zatrubnění svodnice vstupující do intravilánu obce Zaječov v lokalitě Hamburk

Pro posouzení kapacity zatrubnění byla zvolena návrhová srážka P100 s hodnotu 72,3 mm. V tabulce (Tabulka 9) je dále uvedeno procentuální zastoupení šesti typů hyetogramů A - F a odvozené kulminace podle modelu HEC-HMS při dvou variantách počátečního nasycení povodí (Qk_CN2 a Qk_CN3). Tyto hodnoty byly váženy jednak podle mapových podkladů API pro jednotlivé typy hyetogramů (pro typ A a B je v lokalitě určující varianta CN2, pro typ C, D a E je CN2 dána váha 0,75 a CN3 váha 0,25 a pro typ F je CN2 i CN3 dána váha 0,5) a dále podle podílu zastoupení jednotlivých hyetogramů v dané lokalitě (zast. P). Z těchto vážení vychází hodnoty vážených kulminací Qk_vaz_CNx (Qk_vaz_CNx = Qk_CNx * zast. CNx / 100 * zast. P / 100). Výsledná hodnota kulminace Qk_vysl se potom rovná součtu všech hodnot Qk_vaz_CNx, tj. 3,28 m³s⁻¹.

Tabulka 9: Návrhové srážky a zastoupení typů hyetogramů A-F pro dobu opakování 100 let, stupně nasycení odvozené podle podkladů q_{API} a odvozené hodnoty kulminací Q_k

Tvar hyetogramu	P (mm)	zast. P (%)	CN2	CN3	zast. CN2 (%)	zast. CN3 (%)	Q_k_CN2 (m^3s^{-1})	Q_k_CN3 (m^3s^{-1})	$Q_k_vaz_CN2$ (m^3s^{-1})	$Q_k_vaz_CN3$ (m^3s^{-1})
A	72,3	14,7	70,3	84,5	100	0	3,18	8,59	0,466	0,000
B	72,3	19,1	70,3	84,5	100	0	2,96	7,55	0,564	0,000
C	72,3	9,6	70,3	84,5	75	25	2,70	5,99	0,195	0,144
D	72,3	35,9	70,3	84,5	75	25	2,86	5,49	0,771	0,493
E	72,3	7,9	70,3	84,5	75	25	2,49	5,73	0,148	0,114
F	72,3	12,8	70,3	84,5	50	50	1,87	4,22	0,120	0,270
Q_k_vysl (m^3s^{-1}) – výsledná kulminace – vážená podle zast. P a pravděpodobnosti abnormálního nasycení										3,28

V porovnání s kapacitou zatrubnění vyplývá, že by toto zatrubnění mělo bez problémů převést stoletou povodňovou vlnu.

3 Srovnání novosti postupů

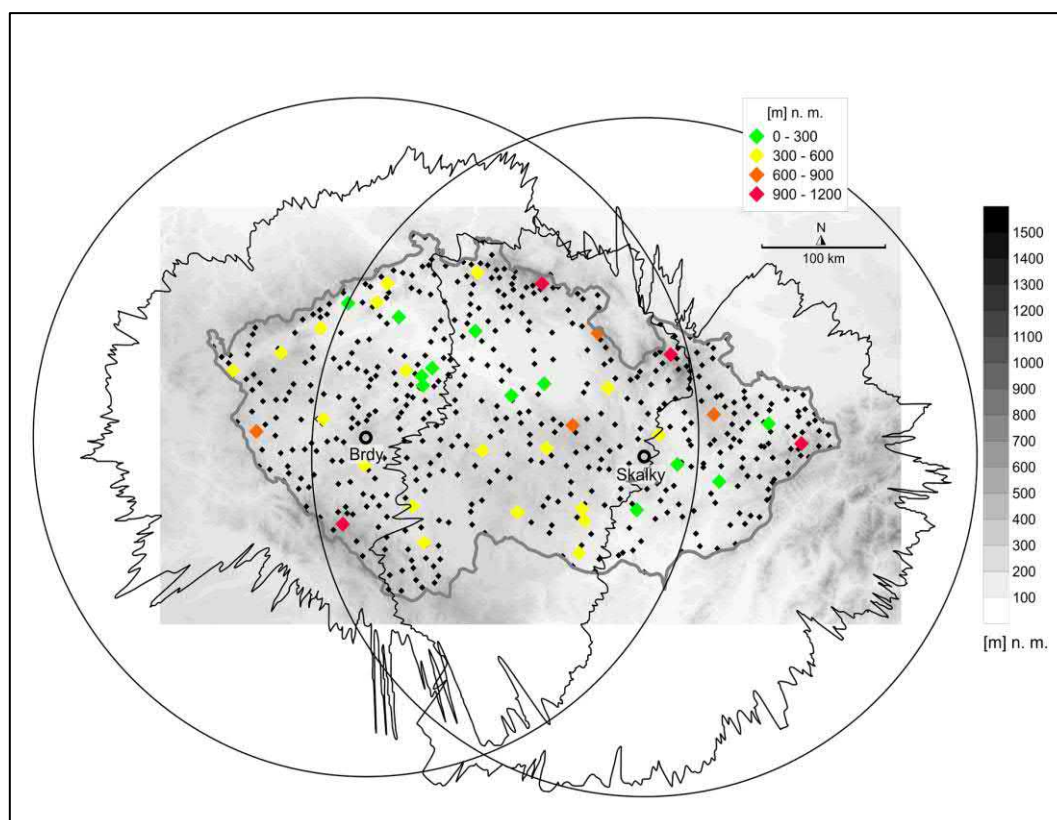
Tato kapitola popisuje změny proti původní metodice a je zacílena na zdůvodnění změn na základě popisovaného inovovaného vědeckého poznání což je v souladu s § 2, odst. 1, písm. b) a písm. c) zákona č. 130/2002 Sb. Tato metodika navazuje a nahrazuje stejnojmennou metodiku, která byla vytvořena v rámci projektu NAZV QJ1520265 „Vliv variability krátkodobých srážek a následného odtoku v malých povodích České republiky na hospodaření s vodou v krajině“ řešeného v letech 2015–2017. Zásadním inovativním přístupem je odvození nových návrhových šestihodinových úhrnů srážek na základě kombinace odhadů z adjustovaných radarových měření a ze srážkoměrů, dále pak stanovení pravděpodobnosti výskytu takových úhrnů v šesti variantách podle průběhu srážkové intenzity při abnormálním předchozím nasycení povodí a určení postupu pro získání návrhových parametrů pro návrhy v ploše povodí a na drobných vodních tocích. Podstatným zlepšením je také odvození návrhových charakteristik z adjustovaných radarových srážek za dvojnásobně dlouhé období (20 roků) oproti předchozí metodice.

3.1 Návrhové srážky

Návrhové srážky byly pro účely metodiky popsány třemi charakteristikami, a to velikostí návrhových šestihodinových úhrnů, procentuálním zastoupením šesti scénářů průběhu srážkové intenzity během nich a pravděpodobností výskytu těchto scénářů za podmínek abnormální předchozí nasycenosti. V této kapitole je nejprve popsána datová základna, následuje popis odvození jednotlivých charakteristik. Na závěr jsou pro srovnání uvedeny jiné práce věnované návrhovým srážkám na území ČR.

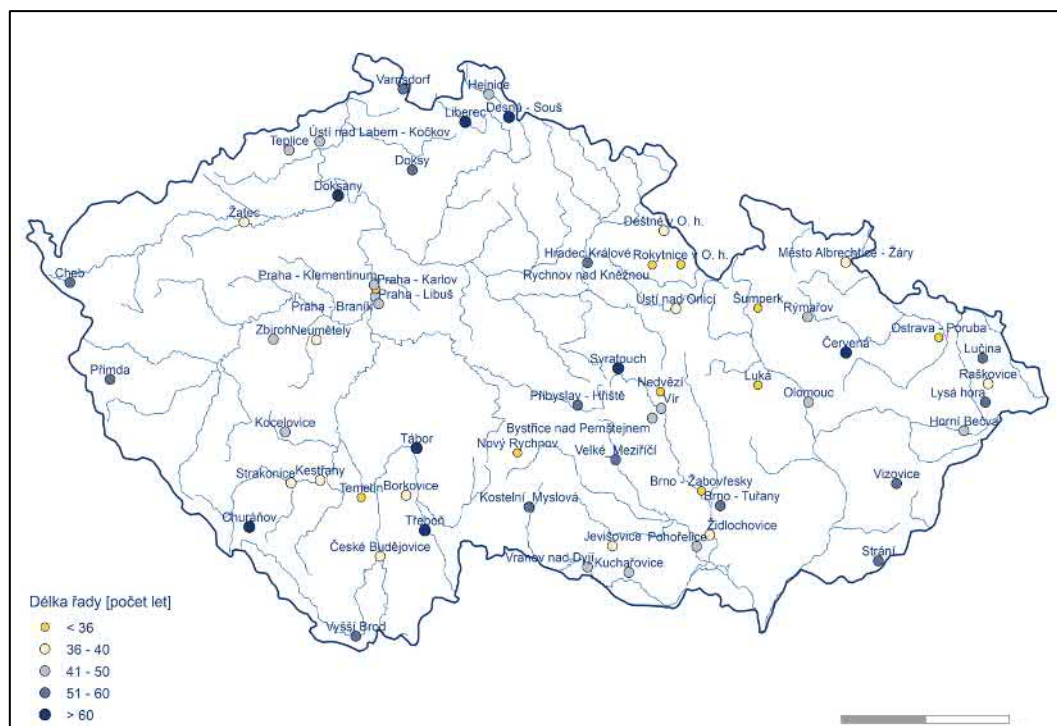
3.1.1 Použitá datová základna

Základním datovým souborem analýz jsou adjustovaná radarová data obsahující časové řady intenzit srážek, které pokrývají bezmrazová období od dubna do října mezi roky 2002 a 2021 s časovým rozlišením 10 minut a území ČR a jeho dvoukilometrové okolí s prostorovým rozlišením 1 km (celkem 82 737 pixelů). Časové rozlišení adjustovaných radarových dat umožnilo uvažovat úhrny srážek nikoli za fixně stanovené šestihodinové úseky, nýbrž klouzavě s krokem 10 minut. Intenzity srážek byly odhadnuty pomocí standardního Z-R vztahu z dat radarové odrazivosti v nadmořské výšce 2000 m n. m. (produkt pseudo-CAPPI 2 km; Novák a Kráčmar, 2002) a poté adjustovány naměřenými denní úhrny srážek ze srážkoměrných stanic ČHMÚ (Obrázek 6). Adjustační algoritmus nejdříve plošně adjustuje denní úhrny odvozené z radarových dat tak, aby jejich suma v pixelech, které svou polohou odpovídají stanicím, odpovídala sumě denních úhrnů naměřených na stanicích. Takto plošně adjustované denní úhrny dále adjustuje lokálně v jednotlivých pixelech úhrny naměřenými na nejbližších stanicích se započtením proměnných vah podle vzdálenosti vstupujících stanic. Nakonec získané adjustované denní úhrny rozděluje do desetiminutových intenzit úměrně velikosti radarové odrazivosti a podle jejího časového průběhu. Adjustační algoritmus byl převzat z Sokol (2003) v podobě, se kterou dále pracovali Bližňák a kol. (2018). Nespornou výhodou těchto dat je jejich plošné pokrytí s vysokým prostorovým rozlišením 1 km, které umožnilo plně využít robustnost aplikovaných progresivních metod regionální frekvenční analýzy. Tyto metody významně redukuje nejistotu v odhadnutých charakteristikách, která je zčásti dána omezenou délkou dostupných radarových měření. Výrazným posunem směrem k dalšímu snižování nejistoty je proto oproti původní metodice použití aktualizovaných prodloužených řad radarových měření do roku 2021.



Obrázek 6: Poloha a doména meteorologických radarů Brdy a Skalky (C-band, Vaisala WRM200) a poloha stanic, jejichž měření denních úhrnů srážek byla použita pro odvození adjustovaných radarových dat. Velké značky odpovídají synoptickým stanicím a jejich barva průměrné nadmořské výšce příslušného 1×1 km pixelu. Vedle maximálního dosahu obou radarů (kružnice) je vyznačena i oblast doporučená pro validní odhad intenzity srážek z měření radarové odrazivosti (vnitřní křivka).

Druhý, nově použitý soubor vstupních dat tvoří dlouhé řady bodových krátkodobých intenzit srážek sestavené ze staničních měření (Obrázek 7). Do zpracování vstupovalo 60 stanic s řadami měření v minutovém a patnácti nebo desetiminutovém časovém kroku a s průměrnou délkou 47 roků v období 1951–2019. Řady byly sestaveny spojením dat z měření klasických ombrografů a automatických srážkoměrů. Bodová frekvenční analýza těchto dat umožnila dále zpřesnit velikosti návrhových úhrnů srážek odhadnuté z adjustovaných radarových dat. Pro zpřesnění byl navržen synergický přístup založený na aplikaci vybrané geostatické metody interpolace, která vhodně kombinuje velikosti návrhových úhrnů odhadnuté z obou vstupních datových souborů. Navržený přístup bere v úvahu silné stránky vstupních dat, mezi které v případě adjustovaných radarových dat patří dobře vyjádřené prostorové gradienty a v případě staničních dat lokálně poměrně spolehlivé velikosti návrhových úhrnů. Zároveň tím také snižuje vliv jejich nedostatků, mezi které v případě adjustovaných radarových dat patří možná nejistota v lokálních odhadech a v případě staničních dat menší prostorová reprezentativnost návrhových úhrnů (Lengfeld, 2020). Předkládaná metodika díky tomu poskytuje vedle pravděpodobnosti výskytu (zastoupení) jednotlivých průběhů srážkových intenzit typických pro silné srážky na území ČR pro vybrané doby opakování úhrnu i nově přímo velikosti návrhových úhrnů. Za základní délku trvání srážky byla opět zvolena délka šest hodin, přičemž pro popis typických průběhů intenzit je využita stejná šestice šestihodinových syntetických hyetogramů.



Obrázek 7: 60 stanic vybraných pro zpracování srážkových intenzit s rozlišením dle finální délky řady ročních maxim

Použité postupy pro výpočet charakteristik návrhových srážek lze s ohledem na vlastnosti vstupujících srážkových dat spolu s aplikovanými metodami považovat za inovativní. Aplikované metody jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách. Popis metody odvození typických průběhů srážkových intenzit je již součástí původní metodiky a není proto explicitně uveden. Prostorová variabilita zastoupení typických průběhů intenzit odhadnutého z prodloužených řad adjustovaných radarových dat se v porovnání s původními výsledky sice může lokálně lišit, ale v základních rysech, zejména v závislosti na topografii, se shoduje. Navíc se dá interpretovat v kombinaci s topografickými činiteli a meteorologickými příčinami, což vedle robustnosti odpovídajících použitých postupů s ohledem na délku vstupujících řad ukazuje i na jejich obecnou validitu (viz kapitola 2.3).

3.1.2 Regionální frekvenční analýza adjustovaných radarových dat

Prvním krokem ke stanovení návrhových šestihodinových úhrnů srážek byla jejich frekvenční analýza v adjustovaných radarových datech. Pro popis rozdělení vysokých srážkových úhrnů v jednotlivých pixelech bylo zvoleno tříparametrické zobecněné rozdělení extrémních hodnot (dále jen GEV z anglického „Generalized Extreme Value“; Coles, 2001), u něhož bylo prokázáno, že je vhodným parametrickým modelem pro srážkové extrémy na území ČR (Kyselý a Píček, 2007):

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left(-\left[1 - \gamma\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{\gamma}}\right), & 1 - \gamma\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right) > 0, \gamma \neq 0. \\ \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\beta}{\alpha}\right)\right], & x \in \mathbb{R}, \gamma = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Ve vyjádření distribuční funkce $F(x)$ je α parametr měřítka, β je parametr polohy a γ je parametr tvaru. S ohledem na relativně krátké dvacetileté řady vstupujících adjustovaných radarových dat byly parametry GEV rozdělení odhadnuty z hodnot L-momentů (Hosking, 1990) a pomocí metody oblasti vlivu (dále jen ROI metoda z anglického „Region-Of-Influence“; Burn, 1990). Odhady parametrů GEV z hodnot L-momentů pro malé a střední výběry dat totiž obecně vykazují lepší vlastnosti než v případě aplikace metody maximální věrohodnosti a metody konvenčních

momentů (Hosking a kol., 1985). Samotný výpočet L-momentů je zároveň poměrně časově nenáročný. Aplikace ROI metody pak navíc vede k-robustnějšímu odhadu parametrů, neboť bere v-úvahu hodnoty L-momentů nejenom v uvažovaném pixelu, ale také v jeho statisticky homogenním okolí. Případný nedostatek informací o extrémech díky omezené délce časové řady v dané lokalitě je tak nahrazen dodatečnou informací v ploše.

Nejdříve byly pro všechny pixely zvlášť určeny bodové hodnoty druhého (l2) a třetího (l3) výběrového L-momentu z ročních blokových maxim úhrnů srážek standardizovaných jejich střední hodnotou. Bloková maxima ovlivněná výskytem artefaktů v polích radarové odrazivosti, zejména v případech rušení signálem Wi-Fi a nereálně vysokých hodnot a prostorových gradientů, nebyla, pokud možno, dále uvažována. Poté byly odvozeny regionální hodnoty l2 (standardizovaný L-koeficient rozptylu) a l3/l2 (L-šikmost) jako vzdáleností vážený průměr odpovídajících bodových L-momentů v oblasti kolem daného cílového pixelu, kterou lze považovat za homogenní. Oblast byla sestavována iteračním postupem doporučeným a popsáným v Kyselý a kol. (2011) a její homogenita testována způsobem uvedeným v Lu a Stedinger (1992) z pohledu rozdělení srážkových extrémů až na místně specifický faktor, kterým je v tomto případě střední hodnota blokových maxim. Parametry GEV byly nakonec odhadnuty tak, že se regionální L-momenty položily rovny jejich teoretickým vyjádřením pro GEV:

$$\gamma = 7.8590z + 2.9554z^2, \alpha = \frac{l_2\gamma}{(1 - 2^{-\gamma})\Gamma(1 + \gamma)},$$

$$\beta = l_1 + \alpha \frac{\Gamma(1+\gamma)-1}{\gamma}, z = \frac{2}{3 + \frac{l_3}{l_2}} - \frac{\ln 2}{\ln 3}, \quad (13)$$

kde Γ značí gama funkci. Pro následné aplikace bylo třeba parametry měřítka α a polohy β ještě vynásobit střední hodnotou blokových maxim v daném pixelu.

Aplikované metody regionální frekvenční analýzy již byly použity a validovány v rámci předchozí metodiky. Nastavení metod bylo opět optimalizováno minimalizací střední kvadratické chyby a maximalizací korelačního koeficientu mezi návrhovými šestihodinovými úhrny srážek z adjustovaných radarových dat a ze staničních měření, tentokrát však přímo s využitím měření krátkodobých intenzit srážek. Detailnější informace k metodám lze nalézt v Kašpar a kol. (2021).

3.1.3 Frekvenční analýza staničních měření krátkodobých intenzit srážek

Kromě adjustovaných radarových dat byla provedena i frekvenční analýza srážkových intenzit měřených na meteorologických stanicích. U uvažovaných 60 stanic byla v databázi ČHMÚ CLIDATA provedena přednostní kontrola dat, především za účelem odstranění chybných vysokých hodnot. Podrobné časové rozlišení měření umožnilo následně spočítat klouzavé úhrny srážek pro rozličné délky trvání.

Pro zachování homogenity aplikovaných metod bylo, podobně jako v případě adjustovaných radarových dat, pro popis rozdělení vysokých šestihodinových úhrnů srážek použito tříparametrické zobecněné rozdělení extrémních hodnot (GEV), jehož parametry byly odhadnuty z prvních tří výběrových L-momentů určených z ročních blokových maxim úhrnů na dané stanici.

Vedle chybných vysokých hodnot se v datech intenzit srážek mohlo vyskytovat i větší množství výpadků měření. Proto bylo u ročních blokových maxim nejdříve rozhodnuto o jejich relevantnosti vzhledem k počtu a povaze chybějících dat v daném roce a některá maxima pak nebyla při odhadu parametrů GEV uvažována. I po dodatečných odstraněních takto nevyhovujících maxim pokrývaly finální soubory maxim pro všechny zpracovávané stanice období 30 let a více (Obrázek 7). V posledním kroku byly vytipovány méně spolehlivé odhady parametrů GEV z porovnání výsledků aplikace dalších metod frekvenční analýzy. Vedle GEV bylo pro popis rozdělení vysokých úhrnů srážek použito dvouparametrické Gumbelovo rozdělení a pro

odhad jejich parametrů vedle L-momentů (Kyselý, 2005) i metoda maximální věrohodnosti (Coles, 2001).

3.1.4 Určení velikosti návrhových úhrnů srážek

Ze znalosti parametrů GEV odvozených pro šestihodinové úhrny srážek byly odhadnuty velikosti návrhových úhrnů. Velikost návrhového úhrnu srážek R s dobou opakování N v rocích je dána vztahem

$$\begin{aligned} \gamma = 0: R &= \beta - \alpha \ln\{\ln[N/(N-1)]\}, \\ \gamma \neq 0: R &= \alpha \{1 - [-\ln((N-1)/N)]^\gamma\} / \gamma + \beta. \end{aligned} \quad (14)$$

Pro zvýšení robustnosti odhadů návrhových úhrnů srážek byly návrhové úhrny z adjustovaných radarových dat zkombinovány s návrhovými úhrny ze staničních měření krátkodobých intenzit srážek. Byl navržen obecný postup, kdy se v prvním kroku spočtou rozdíly v návrhových úhrnech mezi oběma typy dat v 1×1 km pixelech se stanicemi. V druhém kroku se tyto rozdíly interpolují do plochy všech pixelů, kde se jimi korigují návrhové úhrny z adjustovaných radarových dat. Pro interpolaci byla na základě výsledků křížové validace vybrána geostatistická metoda Empirical Bayesian Kriging (Krivoruchko a Gribov, 2019). Metody interpolace z rodiny kriging jsou nejčastěji využívanými interpolačními metodami (Li a Heap, 2008), přičemž jsou obecně považovány za vhodné pro kombinaci radarových a staničních srážkových dat (Goudenhoofd a Delobbe, 2009). Je však nutno dodat, že poměrně nízký počet stanic dostupných v době vytváření této metodiky a jejich nerovnoměrné rozmístění vedlo k obecně malé prostorové závislosti měření mezi stanicemi, která je však důležitým faktorem zvyšujícím efektivitu interpolace (Obrázek 7). I přesto lze konstatovat, že kombinace obou typů dat přináší alespoň lokální zlepšení ve srovnání s doposud využívanými produkty. Použitý přístup má tak velký potenciál do budoucna v souvislosti s plánem zvyšovat počet dostupných stanic s kvalitními a dlouhodobými měřeními krátkodobých intenzit srážek.

Za účelem odstranění vysokofrekvenčních, původem radarových artefaktů v polích návrhových úhrnů srážek byla pole nakonec shlazena třídímním Gaussovým filtrem. Nastavení filtru bylo optimalizováno minimalizací střední kvadratické chyby a maximalizací korelačního koeficientu mezi návrhovými úhrny z adjustovaných radarových dat a staničních měření.

3.1.5 Analýza časového průběhu srážek

Charakteristické průběhy intenzity srážek během návrhových šestihodinových úhrnů byly vyjádřeny pomocí zastoupení šestice syntetických hyetogramů, tedy stejným způsobem jako v metodice Kavka a kol. (2018). Hyetogramy byly odvozeny z reálných událostí s vysokými šestihodinovými úhrny srážek spočtenými z původních adjustovaných radarových dat v místech synoptických stanic. Pro odvození byla použita trojice indexů vyjadřujících míru koncentrace srážek v různých dlouhých časových úsecích během uvažovaného šestihodinového okna. Detailní popis odvození hyetogramů je uveden ve zmíněné metodice Kavka a kol. (2018), příp. v publikaci Müller a kol. (2018) určené i pro mezinárodní odbornou komunitu. Syntetické hyetogramy byly konstruovány tak, aby podíly maximálních úhrnů za 3, 2, 1 a 0,5 hodiny odpovídaly průměrným podílům během reálných srážkových epizod, a to včetně jejich načasování v rámci šestihodinového časového okna.

Zastoupení jednotlivých scénářů časového průběhu silných srážek byla odhadnuta z parametrů GEV pro adjustovaná radarová data, a to zvláště pro různé doby opakování srážek. Zastoupení daného tvaru i_0 pro návrhový šestihodinový úhrn srážek R s dobou opakování N v rocích bylo určeno podle vztahu

$$P_{i0}[\%] \cong 100 \cdot \left(N_{i0} \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{1}{N_i} \right)^{-1} \quad (15)$$

kde N_i značí dobu opakování úhrnu R v rocích pro tvar i , která je určena vztahy

$$N_i = \begin{cases} \left(1 - \exp \left[- \left(1 - \gamma_i \frac{R - \beta_i}{\alpha_i} \right)^{\frac{1}{\gamma_i}} \right] \right)^{-1}, & 1 - \gamma_i \frac{R - \beta_i}{\alpha_i} > 0, \gamma_i \neq 0, \\ \left(1 - \exp \left[- \exp \left(- \frac{R - \beta_i}{\alpha_i} \right) \right] \right)^{-1}, & R \in \mathbb{R}, \gamma_i = 0, \end{cases} \quad (16)$$

kde α_i značí parametr měřítka, β_i parametr polohy a γ_i parametr tvaru odhadnuté z nezávislých blokových ročních maxim šestihodinových úhrnů pro tvar i . I v tomto případě byla výsledná pole pravděpodobností nakonec shlazena třídímní Gaussovým filtrem.

3.1.6 Vyjádření očekávané předchozí nasycenosti

Pro každý ze šesti syntetických hyetogramů byla dále v jednotlivých pixelech určena pravděpodobnost, že takový průběh srážkové události nastane za podmínek silné předchozí nasycenosti. Tato pravděpodobnost byla odhadnuta ze souboru ročních maxim šestihodinových úhrnů srážek s daným průběhem. Pro 10 největších maxim z 20-leté řady byla z adjustovaných radarových dat vypočtena hodnota ukazatele předchozích srážek za pět dní (API5) podle rovnice (11) na straně 19. Na rozdíl od tradičního výpočtu API z denních úhrnů tak zohledňuje i případné srážky, které spadly v období mezi 7:00 místního času a začátkem uvažovaného šestihodinového úseku.

Předchozí nasycenost byla vyjadřována relativně k průměrné hodnotě v daném místě a dané části roku, protože API závisí na klimatologii srážek včetně jejich ročního chodu. Hodnoty API5 tak byly nejprve normovány průměrnou hodnotou tohoto ukazatele v daném pixelu pro daný kalendářní den, odvozenou z průměrných hodnot za období 2002–2021 shlazených Gaussovým filtrem pro $\sigma = 15$ dní. Následně byla relativní nasycenost vyjádřena jako kvantil statistického rozdělení všech normovaných hodnot API5 zjištěných v daném pixelu. Hodnoty kvantilů mezi 0,75 a 0,95 byly uvažovány jako případy zvýšené nasycenosti s lineárně rostoucím stupněm příslušnosti k případům abnormální nasycenosti (od 0 do 1), hodnoty nad 0,95 byly zcela uvažovány jako případy abnormální nasycenosti.

Pro 10 největších ročních maxim šestihodinového úhrnu srážek s daným průběhem byl takto určen průměrný stupeň příslušnosti události k případům abnormální nasycenosti. Tato hodnota vyjadřuje pravděpodobnost, že vysoký srážkový úhrn s daným průběhem spadne do silně nasyceného povodí. Vzhledem k relativně malé délce období pokrytého daty byly bodové pravděpodobnosti dále shlazeny třídímní Gaussovým filtrem.

3.1.7 Další zpracování návrhových hodnot krátkodobých úhrnů srážek

Návrhové hodnoty krátkodobých úhrnů srážek jsou potřebným podkladem pro další výpočty v hydrologické a technické praxi, pro plánování a údržbu odvodňovacích systémů a vyhodnocení dalších rizik spojených s intenzivními srážkami (např. přívalové povodně či plošná eroze půdy). V technické praxi (např. pro navrhování odvodnění stavebních konstrukcí či liniových staveb) jsou potřebné návrhové srážky pro kratší doby trvání než 6 hodin, často jsou požadovány i 5–15-minutové úhrny. Určení návrhových hodnot takto krátkodobých úhrnů srážek je však poměrně obtížným úkolem, neboť sítí automatických srážkoměrů (i jejich předchůdců ombrografů)

Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) s dostatečně dlouhou řadou měření intenzit srážek (srážkových úhrnů v 1-minutovém či 10-minutovém kroku) pro zpracování návrhových srážek je poměrně řídká a tato data vykazují poměrně časté výpadky a chyby.

Komplexní zpracování krátkodobých dešťů z ombrografických měření pro území Česka provedl Trupl (1958). Metodika zpracování krátkodobých srážek včetně výsledných návrhových srážek pro povodí 1. řádu i jednotlivé stanice publikovaná v této práci vycházela z dostupných ombrografických měření do roku 1956 a je využívána až do dnešní doby. V 80. letech na tuto práci navázal RNDr. Václav Jírovský, který zpracoval 5- až 180-minutové deště za období 1961–1986 pro doplnění tabulek Trupla, které sloužilo pro posudkovou činnost ČHMÚ (nepublikováno). Později se této problematice věnovalo několik studií či projektů (např. Šamaj a kol. 1985; Květoň, Zahradníček 1998; Květoň a kol. 2000).

Vzhledem k zjevné potřebě aktualizace těchto údajů je zpracování návrhových hodnot krátkodobých srážek věnována pozornost i v rámci probíhajícího projektu PERUN (TAČR, SS02030040, Prediction, Evaluation and Research for Understanding National sensitivity and impacts of drought and climate change for Czechia), jehož garantem je Ministerstvo životního prostředí. Tento projekt je zaměřen na výzkum klimatických extrémů, sucha a důsledků jeho prohlubování v České republice. Návrhovými charakteristikami srážek se zabývá konkrétně dílčí cíl 6.1 Standardizace návrhových hodnot srážek (regionální časové řady srážek, aktualizované tabulky a čáry náhradních vydatností) se zahrnutím možného vlivu změny klimatu, který řeší jak aktualizaci návrhových hodnot, tak zahrnutí dopadů klimatické změny. Na rozdíl od této metodiky však řeší plošné návrhové srážky, tedy průměrné úhrny srážek na povodích různých řádů.

V rámci projektu PERUN budou provedeny regionální odhady návrhových srážek pro délky trvání deště 10 minut až 3 dny a odvozeny IDF křivky (z angl. Intensity-Duration-Frequency), které pro danou dobu opakování zobrazují závislost intenzity dešťových srážek na délce trvání deště. IDF křivky budou vyhotoveny pro doby opakování od 2 do 100 let. V současnosti je pravděpodobné doplnění návrhových odhadů i pro kratší doby opakování (1/2 roku a 1 rok) vzhledem k potřebnosti těchto údajů v technické praxi.

Návrhové hodnoty budou nejprve odhadnuty na základě historických dat staničních měření srážkových intenzit. K tomu budou využita měření automatickými srážkoměry, které začaly být do sítě ČHMÚ postupně osazovány v roce 1997, a digitalizovaná historická měření manuálními ombrografy. Do zpracování budou vybrány stanice s co nejdelší řadou dostupných měření intenzit srážek. Jedná se o cca 160 stanic, které mají k dispozici řadu měření intenzit srážek delší než 20 let po spojení ombrografických a automatických měření v období od roku 1951. Pro určení návrhových hodnot srážek bude testováno několik metod a přístupů, včetně regionální frekvenční analýzy. Na základě staničních odhadů návrhových srážek budou za pomoci statistických metod identifikovány „homogenní“ regiony, pro něž budou určeny finální IDF křivky. Výsledky DC6.1 projektu PERUN budou v roce 2024 zpřístupněny ve specializované veřejné databázi.

3.2 Navrhování vodohospodářských opatření v krajině

3.2.1 Nestandardní a standardní hydrologické údaje povrchových vod

Rozdělení hydrologických údajů na standardní a nestandardní upravuje podrobně norma ČSN 75 1400 – "Hydrologické údaje povrchových vod". Mezi hydrologické údaje patří mimo jiné odvození teoretické povodňové vlny (TPV) s danou dobou opakování, která v případě, že není k dispozici vodoměrné pozorování pro statistické zpracování, bývá v ČHMÚ zpracována pomocí srážkoodtokového modelování za využití metody CN křivek a jednotkového hydrogramu. Podle doby opakování (N) kulminačního průtoku se TPV řadí mezi standardní údaje ($N \leq 500$ let) nebo nestandardní údaje ($N > 500$ let). TPV jako nestandardní hydrologický údaj je zpracována v ČHMÚ formou hydrologické studie, buď s využitím statistického přístupu (tam kde lze využít pozorovaných dat) nebo hydrologického modelování (obvykle pro menší a nepozorovaná povodí). TPV jako standardní hydrologický údaj nemusí být vždy řešena formou studie a pro její odvození mohou být využity zjednodušené postupy dané příslušným metodickým či pracovním

návodem. Výsledky hydrologického modelování se využívají v ČHMÚ také k ověření některých dalších standardních hydrologických údajů (např. N-letých průtoků). Hydrologické modelování nejčastěji využívá deterministického přístupu v prostředí HEC-HMS (viz kapitola 2.2.1), ale mohou být využita i jiná modelová řešení (např. odvození povodňové vlny s vlivem protipovodňových opatření).

V návaznosti na projekt Kulasová a kol. (2004) byla zpracována metodická příručka pro výběr a aplikaci vhodné metody odvození hydrologických podkladů za účelem posouzení bezpečnosti vodních děl (Kulasová a kol., 2007). Poslední aktualizace proběhla v roce 2017 v podobě interního metodického pokynu (Kulasová a Boháč, 2017) a popisuje doporučené postupy k odvozování TPV jako nestandardních hydrologických údajů. Stejně postupy lze ale využít i pro odvozování TPV jako standardních hydrologických údajů.

Deterministický přístup v odvozování TPV je založen na přímém výpočtu průběhu povodňové vlny na základě prostorového a časového rozložení návrhové srážky. Výpočet využívá kalibrovaných či jiným způsobem odvozených parametrů srážko-odtokového modelu, přičemž mezi nejdůležitější parametry patří ty, které určují podíl přímého odtoku (velikost odtokové ztráty) a transformaci tohoto odtoku do hydrogramu jakožto odezvy povodí na spadlé srážky. Tvar odvozené vlny je silně determinován tvarem návrhového hyetogramu. Metodický postup je založen na odvozování TPV z přívalových či silně orograficky zesílených srážek, jedná se o povodně vyskytující se převážně v letní sezóně.

Další charakteristikou deterministických přístupů je fakt, že nelze určit statistický význam výstupu z modelu (v našem případě teoretické povodňové vlny), neboť nelze odvodit či popsat statistický význam vstupů do modelu jakožto kombinace různých dat stochastického a nestochastického charakteru (např. návrhové srážky a předchozí nasycenost oproti fyzicko-geografickým charakteristikám povodí). Aby tato nejistota byla alespoň částečně odstraněna, byl zaveden zjednodušující předpoklad, že návrhová srážka s dobou opakování N s určitým přesně definovaným časovým a prostorovým rozložením vyvolá odezvu povodí v podobě povodňové vlny, jejíž parametry (objem, velikost kulminace) se budou blížit době opakování stejného významu.

Deterministický přístup k odvozování TPV je založen na použití srážko-odtokového modelu HEC-HMS, který splňuje požadavky na rutinní provoz v hydrologické praxi ČHMÚ. Tento přístup je vhodný spíše pro menší a nepozorovaná povodí horského a podhorského typu, příp. všude tam, kde jsou velikost a tvar povodňové vlny formovány morfologií terénu v povodí a hydraulicko-morfologické charakteristiky koryt a inundací hrají spíše podružnou roli.

Na pracovišti ČHMÚ průběžně probíhá zpřesňování datových podkladů a aktualizace pracovních nástrojů týkajících se odvození standardních i nestandardních dat. Tato metodika je jedním z podkladů pro aktualizaci postupů.

3.2.2 Principy hydrologických modelů

Využitím hydrologického modelování se v minulosti zabývala celá řada dokumentů. Pro malá povodí a pro opatření v ploše povodí se často jedná o kombinaci hydrologického modelování a řešení protierozních opatření. V různých metodikách jsou vhodné modely často jen zmíněny bez konkrétního návodu na jejich využití. Některé modely, které jsou uváděny, lze jen obtížně promítnout do praxe, protože se jedná v podstatě o autorské softwary bez detailnějšího popisu. Jiné uváděné modely jsou naopak pro svou komplexnost velmi náročné na získání relevantních vstupních dat, detailní znalost problematiky a v neposlední řadě bývají relativně drahé.

Pro dimenzování vodohospodářských opatření v krajině je možné se stejným výsledkem využít jednoduché konceptuální modely, stejně jako ty složité, fyzikálně založené. Kontinuální modely vyžadují kalibraci na měřených časových řadách, které zpravidla nejsou k dispozici vůbec, nebo je jejich pořízení nákladné. Přehled modelů v minulosti nebo aktuálně využívaných je v následující tabulce (Tabulka 10) a doplňující tabulce kategorií charakteristik modelů (Tabulka 11). Shrnutí

návodů, norem a metodik, které předcházejí vydání této metodiky a zabývají se hydrologickým modelováním, je uvedeno v následující kapitole.

Tabulka 10: Přehled modelů uváděných v českých metodikách, normách a odborných dokumentech

Model	Prostorové dělení a měřítko	Časové měřítko	Parametry srážky	Metoda ef. srážky	Routing v ploše
Atlas HYDROLOGIE	malé povodí	epizodní	hyetogram	B	D
Erosion 2D/3D	regionální	epizodní	hyetogram	A2	B3
DesQ/MaxQ	1 nebo 2 desky, povodí do 10 km ²	epizodní	blokový déšť	B	B2
SMODERP 1D/Line	1D svah	epizodní	hyetogram	A1	B3
SMODERP 2D	2D mikropovodí, distribuovaný	epizodní	hyetogram	A1	B1
WEPP	regionální / lokální	epizodní / kontinuální	hyetogram	A2	B3
SWAT	povodí, HRU - semidistribuovaný	kontinuální	řada úhrnů	A2 / B	D
KINEROS	semidistribuovaný	epizodní	hyetogram	C	B2
TOPKAPI	plně distribuovaný	kontinuální / epizodní	řada	D	B1
Topmodel	povodí, semidistribuovaný	kontinuální / epizodní	řada	D	C
MikeSHE	půdní profil až povodí, plně distribuovaný	epizodní / kontinuální	hyetogram / řada / mapy	A2 / A3	A
HMS	celistvý, semidistribuovaný	epizodní (kontinuální)	hyetogram	A2 / B / C	B1/D
KINFIL	povodí, semidist, kaskáda desek	epizodní	hyetogram	A2	B2
HydroCAD	malé povodí	epizodní	hyetogram	B	D

Tabulka 10 uvádí přehled epizodních modelů, jejichž použití bylo v českých podmínkách častěji zaznamenáno. Klasifikovány byly podle příbuznosti výpočetních metod, které určují podobu odezvy na příčinnou srážku. Konkrétně se jedná o metodu stanovení efektivní srážky a metodu transformace efektivní srážky do odtokové odezvy, tzv. routingu přímého odtoku. Jednotlivé kategorie podrobněji rozvádí další tabulka (Tabulka 11).

Tabulka 11: Výpočetní metody a kritéria pro klasifikaci epizodních modelů

Metoda ef. srážky		Routing přímého odtoku	
A1	fyzikální, infiltrace dle Philipa	A	fyzikální, difuzní vlna
A2	fyzikální, infiltrace dle Greena & Ampta	B1	fyzikální, kinem. vlna na reálném 2D povrchu
A3	fyzikální, infiltrace dle Richardse	B2	fyzikální, kinem. vlna na koncept. povrchu
B	konceptuální (SCS-CN aj.)	B3	fyzikální, kinem. vlna na 1D profilu
C	empirická (exp. pokles aj.)	C	typ Topmodel (travel time function)
D	typ Topmodel	D	hydrogram
E	konceptuální, systém nádrží	E	konceptuální, systém nádrží

3.2.3 Komentář k dalším metodickým pokynům zmiňujícím hydrologické modely

Vývoj v modelovacích nástrojích jde rychle dopředu. Soudobé a stále platné dokumenty, které jsou dále popsány a vztahují se k modelování, aktuální stav příliš neodrážejí.

Metodika MŽP – odboru ochrany vod (2008) stanovuje postup komplexního řešení protipovodňové a protierozní ochrany pomocí přírodních blízkých opatření. Pro stanovení odtokových poměrů explicitně jmenuje metodu CN v klasické podobě a v modifikaci modelu DesQ-MaxQ. Jako na hlavní metodický podklad se odvolává na starší metodiku ochrany zemědělské půdy (Janeček a kol. 2007). V kapitole hodnocení účinnosti navržených opatření pak metodika MŽP pro detailní posouzení efektů uvádí model HYDROG.

Doporučený standard technický – Protierozní ochrana (2000) jmenuje mezi empirickými modely USLE a dva z ní odvozené modely. RUSLE představuje pouze zpřesnění výpočtu některých faktorů původní univerzální rovnice, MUSLE potom univerzální rovnici kombinuje s metodou CN. Mezi modely erozních procesů jsou doporučeny modely AGNPS, EPIC, SMODERP, a EROSION 2D a 3D.

Doporučený standard technický – Hydrologické výpočty v protierozní ochraně půdy (2001) v případech, kdy není nutné či možné použít hydrologické podklady podle ČSN 75 1400 Hydrologické údaje povrchových vod (Kulasová a Fremrová, 2014) uvádí jako vhodný model metodu CN pro výpočet objemu přímého odtoku. Pro stanovení kulminačního průtoku pak udává nomogram založený na době koncentrace. Poněkud problematická může být kombinace této na empirickém základě založené metody stanovení kulminačního průtoku s uvedeným přístupem pro výpočet doby koncentrace.

Totožný přístup jako předchozí je podrobněji rozvedeno v metodice „Ochrana zemědělské půdy před erozí“ (Janeček 2012), která jej doplňuje o simulační modely HYDROCAD, SMODERP, KINFIL, EROSION 2D a 3D a WEPP. Modely jsou uvedeny bez bližšího popisu. Získání vstupních dat metodika nezahrnuje. Tato metodika by měla být v roce 2023 aktualizována a měla by být v souladu inovativními přístupy uvedených v této metodice.

Česká technická norma ČSN 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních (Kaisler, a kol. 2014) pracuje s termínem Kontrolní povodňová vlna, kterou má zpracovávat ČHMÚ nebo jiné odborné pracoviště. Tato norma se ale spíše vztahuje k významným vodním dílům a většina staveb v krajině vyjma několika málo významných rybníků a suchých nádrží do ní nikterak nespadá. Nicméně tato norma uvádí, že kromě statistického přístupu je k jejímu odvození možné využít deterministický model a jako příklad norma uvádí HEC-1 nebo frekvenční verzi TOPMODEL.

Metodika „Navrhování technických protierozních opatření“ (Kadlec a kol, 2014) se soustředí především na umístění prvků z hlediska protierozní ochrany a vlastní dimenzování konkrétních prvků je omezeno na metodu SCS-CN a částečně na model SMODERP. Metodika obsahuje především přehled technických protierozních opatření. Získání relevantních podkladů není v této metodice nijak do detailu řešeno.

Odvětvová technická norma TNV 75 2102 – Úpravy potoků (Havlík a Fremrová 2010) pak umožňuje využití hydrologické modely do povodí o ploše 5 km².

Metodika “Ochrana umělých svahů před erozí a stabilizace povrchové vrstvy” (Kavka, P.; Vaníček, M.; Dufka 2021) uvádí jako výpočetní nástroj pro výpočet odtoků z okolí liniových staveb model SMODERP. Na tuto metodiku by měla v roce 2023 navazovat aktualizace TP 53 – protierozní opatření na svazích pozemních komunikací, kde bude zahrnut výpočet odtoků z přispívajících ploch v okolí liniových staveb. Tato aktualizace TP 53 by také měla být v souladu s inovativními přístupy této metodiky.

4 Ekonomické aspekty

Metodika se zaměřuje především na variabilitu návrhových srážek a její vliv na výsledky hydrologických modelů, které slouží jako nástroje pro navrhování technických úprav odtokových poměrů nebo protierozních opatření v povodí. Cílem je poskytovat odborné veřejnosti datové podklady a tím snižovat náklady spojené s předprojektovou přípravou a variantním návrhem úprav v povodí nebo na malých tocích. Pro zavedení této metodiky nejsou nutné žádné další přímé investice. Naopak, autoři si kladou za cíl zpřístupnit odborné veřejnosti nové a jinak obtížně získatelné údaje.

Aplikace metodiky zvýší efektivitu vlastního procesu projektování a plánování. Metodika poskytuje lepší podklady a vodítka umožňující efektivnější a účinnější navrhování opatření v krajině. Tuto úsporu není možné přesně vyčíslit. Celková úspora je závislá na počtu realizovaných projektů a na účinnosti realizovaných opatření. Samotná opatření nejsou předmětem této metodiky a jsou vždy individuálním návrhem projektanta. Nicméně v obecné rovině účinnější krajinná opatření mohou vést ke zvýšení zadržování vody v krajině. Dobrý návrh pak umožní lepší fungování opatření a zároveň sníží možné škody na samotné stavbě a okolí způsobené nevhodným opatřením. Na druhou stranu zbytečně předimenzované stavby znamenají větší zábor půdy, což může být velký problém například při tvorbě plánu společných zařízení nebo zvýšené investice ze strany investora. Všechny tyto přínosy jsou zřejmé, ale jejich ekonomické vyčíslení by nutně vedlo k příliš hrubým odhadům.

Důležitou součástí předkládané metodiky je datový portál rain.fsv.cvut.cz, který je provozován na pracovišti hlavního řešitele. Portál je koncipován tak, aby nevyžadoval žádné větší výdaje. Zvolené řešení není licencováno s žádným komerčním softwarem, který by znamenal další náklady. Na tomto portálu jsou k dispozici geoprocessingové služby a nástroje pro rychlé a efektivní získání návrhových charakteristik a dalších dat vhodných pro navrhování.

5 Popis uplatnění metodiky

Metodika najde uplatnění ve vodním hospodářství, např. při zpracování pozemkových úprav, studií na ochranu půdního fondu, zvyšování retence krajiny a projektů protierozních a protipovodňových opatření v lokálním měřítku malých povodí. Potenciálními uživateli jsou projektanti hydrotechnických staveb v malých povodích a autoři studií odtokových poměrů v povodích, jejichž cílem je identifikovat kritická místa infrastruktury, navrhnout zlepšení stavu povrchových vod a zlepšit protipovodňovou ochranu. Zásadním přínosem je zvýšení kvality a standardizace zpracování studií představujících variantní řešení. Podklady zpracované metodikou jsou důležitým vstupem pro návrh plánu společných zařízení v rámci komplexních pozemkových úprav, které se mohou stát základem dlouhodobě udržitelné stabilní krajiny.

Metodika nabízí návod na efektivní využití kombinace dat návrhových srážek se zahrnutím variability jejich tvarů a stavu počátečního nasycení ve vztahu hydrologickým modelům při navrhování opatření v krajině. Poskytuje komplexní pohled na problematiku hydrologického modelování s vazbou na realizaci staveb.

Publikace má omezený náklad a bude nabízena odborné veřejnosti. Elektronická verze bude umístěna na webových stránkách rain.fsv.cvut.cz či dalších stránkách řešitelského kolektivu. Po vydání bude metodika šířena mezi projektanty Českomoravské komory pro pozemkové úpravy (ČMKPÚ) a České společnosti krajinných inženýrů (ČSKI), dále na pracoviště Státního pozemkového úřadu, dotčená ministerstva, státní podniky Povodí a vybrané orgány státní správy a samosprávy, případně další zainteresované organizace a profesní sdružení, jako je ČKAIT nebo ČSSI. Předpokládá se také propagace na profesních seminářích a konferencích a její uplatnění při výuce předmětů souvisejících s hydrologickým modelováním, protierozní ochranou a hospodařením s vodou v krajině. Metodika bude k dispozici pro výuku na odborných školách a středních školách v oblasti vodního hospodářství a krajinného inženýrství.

6 Seznam použité související literatury

- Beitlerová, H., Žížala, D., Minařík R., Strouhal L., Kavka P., Juřicová A., 2021. "Fyzikální a Hydopedologické Vlastnosti Půd ČR." <https://rain.fsv.cvut.cz/pudy/hydro-pudy/>.
- Beitlerová, H., Devátý, J., Stehlík, M., Lenz, J., Kapička, J., Dostál, T., Pavel, M., Žížala, D., Minařík, R., Juřicová, A., Zelenková, K. (2021). Využití matematického simulačního modelu EROSION-3D pro posuzování erozní ohroženosti a navrhování ochranných opatření (1. vydání). Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.
- Beitlerová, H., Žížala, D., Minařík, R., Juřicová, A., & Kapička, J., (2021). Zrnitostní složení zemědělské půdy ČR v německém klasifikačním systému KA5 [Map]. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v.v.i.
- Bližňák, V., Kašpar, M., Müller, M., 2018. Radar-based summer precipitation climatology of the Czech Republic. *Int. J. Climatol.*, 38, 677–691. DOI: 10.1002/joc.5202
- Burn, D. H., 1990. Evaluation of regional flood frequency analysis with a region of influence approach. *Water Resources Research*, 26, 2257–2265. DOI: 10.1029/WR026i010p02257
- Coles, S., 2001. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer-Verlag, London, 183 p.
- Goudenhoofd, E., Delobbe, L., 2009. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 195–203. DOI: 10.5194/hess-13-195-2009
- Hosking, J. R. M., 1990. L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society*, 52B, 105–124. DOI: 10.4236/ojs.2012.23044
- Hosking, J. R. M., Wallis, J. R., Wood, E. F., 1985. Estimation of the generalized extreme-value distribution by the method of probability-weighted moments. *Technometrics*, 27, 251–261. DOI: 10.2307/1269706
- Janeček, M. a kol., 2012. *Ochrana zemědělské půdy před erozí- Metodika*. 2012. Praha: Česká zemědělská univerzita Praha. ISSN 978-80-87415-42-9.
- Kadlec, V., Dostál, T., Vrána, K., Kavka, P., Krása J., Devátý J., Podhrázská J., Pochop M., Kulířová P., Herřmanovská D., Novotný I., Papaj V., 2014. *Navrhování technických protierozních opatření*. 2014.
- Kašpar, M., Bližňák, V., Hulec, F., Müller, M., 2021. High-resolution spatial analysis of the variability in the subdaily rainfall time structure. *Atmos. Res.*, 248, 105202. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105202
- Kavka, P., Müller, M., Strouhal, L., Kašpar, M., Bližňák, V., Landa, M., Weyskrabová, L., Pavel, M., Dostál, T., 2018. *Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině*. České vysoké učení technické v Praze, Ústav fyziky atmosféry AV ČR v. v. i., Sweco Hydroprojekt a.s. Certifikovaná metodika, číslo předpisu: 3/2018-SPU/O. 82 stran. ISBN: 978-80-01-06363-7, <https://rain.fsv.cvut.cz/>
- Kavka, P.; Vaníček, M.; Dufka, D. 2021. "Ochrana Umělých Svahů Před Erozí a Stabilizace Povrchové Vrstvy," 29.
- Krivoruchko, K., Gribov, A., 2019. Evaluation of empirical Bayesian kriging. *Spatial Statistics*, 32, 100368. DOI: 10.1016/j.spasta.2019.100368
- Kulasová, B. a Boháč, M., 2017. Odvozování teoretických povodňových vln jako nestandardních hydrologických údajů. Metodický pokyn MP NH 2017/02 (232312), ČHMÚ Praha.

- Kulasová, B., Šercl, P. a Boháč, M., 2004. Projekt QD1368 „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“. Závěrečná zpráva. ČHMÚ Praha.
- Kulasová, B., Šercl, P. a Boháč, M., 2007. Metodická příručka pro výběr a aplikaci vhodné metody odvození hydrologických podkladů za účelem posouzení bezpečnosti vodních děl. Projekt QD1368 „Verifikace metod odvození hydrologických podkladů pro posuzování bezpečnosti vodních děl za povodní“. Dílčí výstup V07, ČHMÚ Praha.
- Květoň, V. a kol., 2000. Vývoj statistických metod pro odhad extrémních srážek. [Závěrečná zpráva výzkumného úkolu VaV 510/3/97 za rok 1999.] ČHMÚ.
- Květoň, V., Zahradníček, J., 1998. Vývoj metod pro stanovení extrémních povodní. Výzkumný úkol MŽP ČR VaV 510/3/97. DÚ 2.2 Vývoj statistických metod pro odhad extrémních srážek, Závěrečná zpráva za rok 1998. Praha:ČHMÚ.
- Kyselý, J., 2005. Odhad parametrů rozdělení extrémních hodnot metodou L momentů. Meteorologické zprávy, 58, 161–167.
- Kyselý, J., Gaál, L., Pícek, J., 2011. Comparison of regional and at-site approaches to modelling probabilities of heavy precipitation. Int. J. Climatol., 31, 1457–1472. DOI:10.1002/joc.2182
- Kyselý, J., Pícek, J., 2007. Regional growth curves and improved design value estimates of extreme precipitation events in the Czech Republic. Climate Research, 33, 243–255. JSTOR: stable/24869338
- Lengfeld, K., Kirstetter, P.-E., Fowler, H. J., Yu, J., Becker, A., Flamig, Z., Gourley, J., 2020. Use of radar data for characterizing extreme precipitation at fine scales and short durations. Environ. Res. Lett., 15, 085003. DOI: 10.1088/1748-9326/ab98b4
- Li, J., Heap, A. D., 2008. A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. Geoscience Australia, Canberra, 137 p.
- Lu, L.-H., Stedinger, J. R., 1992. Sampling variance of normalized GEV/PWM quantile estimators and a regional homogeneity test. Journal of Hydrology, 138, 223–245. DOI: 10.1016/0022-1694(92)90166-S
- Müller, M., Bližňák, V., Kašpar, M., 2018. Analysis of rainfall time structures on a scale of hours. Atmos. Res., 211, 38–51. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.04.015
- Natural Resources Conservation Service (NRCS), 2010. Part 630 Hydrology, National Engineering Handbook Chapter 15: Time of Concentration, U. S. Department of Agriculture.
- Novák, P., Kráčmar, J., 2002. New data processing in the Czech weather radar network, in: ERAD Publication Series 1, 328–330.
- Sokol, Z., 2003. The use of radar and gauge measurements to estimate areal precipitation for several Czech river basins. Stud. Geophys. Geod., 47, 587–604. DOI: 10.1023/A:1024715702575
- Straub, T.D., Melching, C.S., a Kocher, K.E., 2000. Equations for estimating Clark unit-hydrograph parameters for small rural watersheds in Illinois: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00–4184, 30 p., <https://doi.org/10.3133/wri004184>.
- Strouhal, L, H Beitlerová, P Kavka, D Žížala, and R Minařík. 2021. “Fyzikální a Hydopedologické Vlastnosti Půd Nejen pro Návrh Společných Zařízení v Rámci PÚ.” Pozemkové Úpravy 2: 9.
- Šamaj, F., Valovič, Š., Brázdil, R., 1985. Denné úhrny zrážok s mimoriadnou výdatnosťou v ČSSR v období 1901–1980. Zborník prác SHMÚ Bratislava.
- Trupl, J., 1958. Intenzity krátkodobých dešťů v povodích Labe, Odry a Moravy. Práce a studie, sv. 97. Praha: VÚV.

U. S. Army Corps of Engineers (USACE), 1994. Engineering and Design: Flood-Runoff Analysis. Engineer manual EM 1110-2-1417. U. S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000, srpen 1994.

U. S. Army Corps of Engineers (USACE), 2021. HEC-HMS Technical Reference Manual. Davis, CA: U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Online: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm> [cit. 1. 12. 2022].

U. S. Army Corps of Engineers (USACE), 2022. HEC-HMS User's Manual, Version 4.11.0, Davis, CA: U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Online: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.11> [cit. 1. 12. 2022].

Vopravil, J. 2018. "Optimalizace Využívání Zemědělské Půdy z Pohledu Podpory Infiltrace a Retence Vody s Dopady Na Predikci Sucha a Povodní v Podmínkách České Republiky." VUMOP v.v.i.

6.1 Předpisy a normy

Technický standard dokumentace PSZ v pozemkových úpravách, Státní pozemkový úřad, 2022

Metodický návod pro provádění pozemkových úprav, MN 01/2022, Státní pozemkový úřad

ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů

ČSN 75 2101 Ekologizace úprav vodních toků

ČSN 75 2130 Křížení a souběhy vodních toků s dráhami, pozemními komunikacemi a vedeními

ČSN 75 2405 Vodohospodářská řešení vodních nádrží

ČSN 75 2410 Malé vodní nádrže

ČSN 75 1400 Hydrologické údaje povrchových vod

TNV 75 2102 Úpravy potoků

TNV 75 2103 Úpravy řek

TNV 75 2415 Suché nádrže

TNV 75 2935 Posuzování bezpečnosti vodních děl při povodních

Technická doporučení pro hrazení bystřin a strží, Ministerstvo zemědělství – Česká společnost krajinných inženýrů, 2020

DOST – Protierozní ochrana, Informační centrum ČKAIT, Praha, 2000

DOST – Hydrologické výpočty v protierozní ochraně půdy, Informační centrum ČKAIT, Praha, 2001

SCS, 1986. Tech. Rep. 55: Urban hydrology for small watersheds.

7 Seznam publikací, které předcházely metodice a byly publikovány, pokud existují, případně výstupy z určité znalosti, jestliže se jedná o originální práci

Bližňák, V., 2022. Příprava adjustovaných radarových odhadů srážek pro následné meteorologické a hydrologické aplikace. Variabilita krátkodobých srážek v hydrologickém modelování. 13. října, FSv ČVÚT, Praha.

https://rain.fsv.cvut.cz/data/files/konference/WEB_03_Bliznak_radary_priprava.pdf

Bližňák, V., Kašpar, M., Müller, M., 2018. Radar-based summer precipitation climatology of the Czech Republic. *Int. J. Climatol.*, 38, 677–691. DOI: 10.1002/joc.520.

Crhová L., Kliegrová S., Valeriánová A., 2022. Měření srážkových intenzit na stanicích Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) a průběh jejich zpracování. *Meteorologické zprávy*, roč. 75, č. 2, s. 37–43. ISSN 0026-1173.

Kašpar, M., 2022. Návrhové subdenní úhrny srážek a jejich průběhy odvozené z radarových dat a staničních měření. Variabilita krátkodobých srážek v hydrologickém modelování. 13. října, FSv ČVÚT, Praha. https://rain.fsv.cvut.cz/data/files/konference/WEB_04_Kaspar_navrhovky.pdf

Kašpar, M., Bližňák, V., Hulec, F., Müller, M., 2021. High-resolution spatial analysis of the variability in the subdaily rainfall time structure. *Atmos. Res.*, 248, 105202. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105202.

Kašpar, M., Bližňák, V., Hulec, F., Müller, M., 2022. Spatial analysis of the variability in the short term rainfall time structure. 11th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 29th August - 2nd September, Locarno, Switzerland. <https://enacshare.epfl.ch/dUQ4fCXGYPh3RbcKWFpwL> (CLIP2_Kašpar.pdf).

Kavka, P.; Jeřábek, J.; Landa, M. SMODERP2D—Sheet and Rill Runoff Routine Validation at Three Scale Levels. *Water* 2022, 14, 327. <https://doi.org/10.3390/w14030327>

Kavka, Petr. 2021. "Spatial Delimitation of Small Headwater Catchments and Their Classification in Terms of Runoff Risks" *Water* 13, no. 23: 3458. <https://doi.org/10.3390/w13233458>

Kavka, P. a L. Strouhal. Variability of surface runoff processes at plot, eld block and catchment scales. In: *The Frontiers In Hydrology Meeting 2022*. Washington: American Geophysical Union, 2022. Dostupné z: <https://agu.confex.com/agu/hydrology22/meetingapp.cgi/Paper/1036307>

Kavka, P. a M. Neumann. Swinging-Pulse Sprinkling Head for Rain Simulators. *Hydrology*. 2021, 2(8), ISSN 2306-5338. DOI 10.3390/hydrology8020074. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2306-5338/8/2/74/pdf>

Kavka, P. a kol. Návrhové krátkodobé srážky pro vodohospodářské stavby v krajině. *Pozemkové úpravy*. 2019, 27(2), 11-16. ISSN 1214-5815.

Kavka, P., L. Strouhal a J. Cajthaml. Definition of Headwater Catchment Boundaries. In: *Abstracts of the International Cartographic Association. 30th International Cartographic Conference, Florence, 2021-12-14/2021-12-18*. Firenze: International Cartographic Association, 2021. ISSN 2570-2106. Dostupné z: https://www.icc2021.net/wp-content/uploads/2021/12/ICC_2021_Programmaweb_211214.pdf

Landa, M. a kol. Could be hydrological model parameters inferred from a soil texture?. In: *EGU General Assembly 2019. European Geosciences Union General Assembly 2019, Vienna, 2019-04-08/2019-04-12*. Vienna: European Geosciences Union, 2019. sv. vol. 21. ISSN 1607-7962. Dostupné z: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-13921.pdf>

Landa, M. a kol. SMODERP2D SOIL EROSION MODEL ENTERING AN OPEN SOURCE ERA WITH GPU-BASED PARALLELIZATION. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote*

Sensing and Spatial Information Sciences. FOSS4G, Bukurešť, 2019-08-26/2019-08-30.

Göttingen: Copernicus GmbH (Copernicus Publications, 2019. s. 143-149. ISSN 1682-1750.

Müller, M., 2022. Pravděpodobnost nasycení povodí srážkami před silnými srážkami. Variabilita krátkodobých srážek v hydrologickém modelování. 13. října, FSv ČVÚT, Praha.

https://rain.fsv.cvut.cz/data/files/konference/WEB_05_MullerAPI.pdf

Müller, M., Bližňák, V., Kašpar, M., 2018. Analysis of rainfall time structures on a scale of hours.

Atmos. Res., 211, 38–51. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.04.015.

Neumann, M. a kol. Effect of plot size and precipitation magnitudes on the activation of soil erosion processes using simulated rainfall experiments in vineyards. *Frontiers in Environmental Science*. 2022, ISSN 2296-665X.

DOI 10.3389/fenvs.2022.949774. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenvs.2022.949774/full>

Neumann, M. a kol. Rainfall simulation experiments in vineyards comparing two different plot scales. In: EGU General Assembly 2021. European Geosciences Union General Assembly 2021, online, 2021-04-19/2021-04-30. Göttingen: Copernicus Publications, 2021.

DOI 10.5194/egusphere-egu21-5031. Dostupné

z: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU21/EGU21-5031.html>

Neumann, M. a kol. Rainfall Simulators – how plot scale affects results. In: EGU General Assembly 2022. European Geosciences Union General Assembly 2022, Vídeň, online, 2022-05-23/2022-05-27. Göttingen: Copernicus Publications, 2022. DOI 10.5194/egusphere-egu22-4947.

Dostupné z: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU22/EGU22-4947.html>

Neumann, M. a kol. Swiping/pulse portable nozzle rainfall simulator. In: EGU General Assembly 2020. European Geosciences Union General Assembly 2020, online, 2020-05-04/2020-05-08.

Göttingen: Copernicus Publications, 2020.

Neumann, M. Implementace výpočtu pohybu sedimentu v modelu SMODERP. Datum obhajoby 2022-11-14. Doktorská práce (Ph.D.). ČVUT FSv. Katedra hydromeliorací a krajinného inženýrství. Vedoucí práce P. Kavka a J. Krasa.

Strouhal, L. a P. Kavka. Hydrologické skupiny půd – metodiky a datové podklady (1. část). *Vodní hospodářství*. 2022, 72(6), 4-10. ISSN 1211-0760.

Strouhal, L. a P. Kavka. Hydrologické skupiny půd – rozevřené nůžky hydrologických výpočtů (2. část). *Vodní hospodářství*. 2022, 72(9), 7-12. ISSN 1211-0760.

8 Přílohy

8.1 Tabulka tvarů šestihodinových srážek

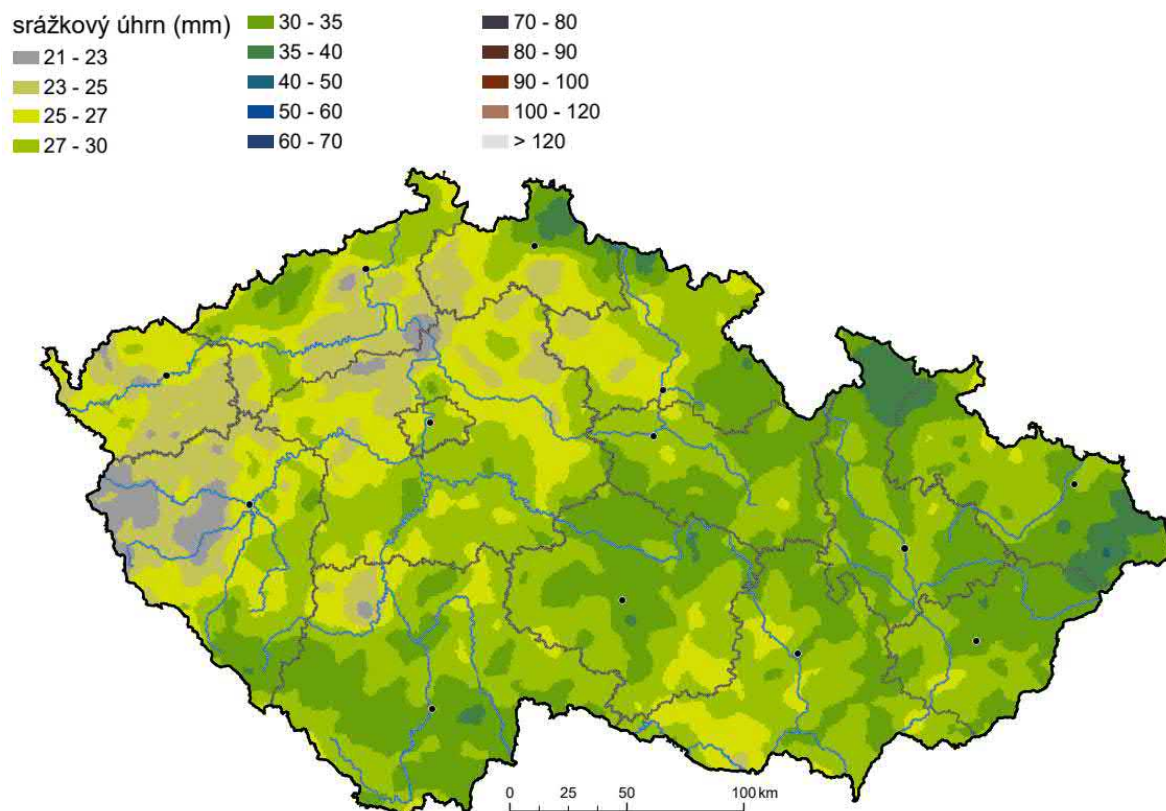
Procentuální (jednotkové) pětiminutové úhrny pro tvary šestihodinových srážek A–F (%)						
Čas (min)	A	B	C	D	E	F
0	0	0	0	0	0	0
5	0,02	0,02	0,11	0,23	0,09	0,58
10	0,03	0,03	0,18	0,35	0,13	0,84
15	0,05	0,05	0,26	0,45	0,16	0,97
20	0,06	0,05	0,30	0,52	0,18	1,04
25	0,07	0,05	0,31	0,56	0,19	1,04
30	0,06	0,06	0,30	0,73	0,20	1,03
35	0,06	0,06	0,26	1,08	0,22	1,01
40	0,05	0,07	0,24	1,46	0,24	0,99
45	0,04	0,08	0,23	2,42	0,27	0,99
50	0,04	0,08	0,23	4,00	0,29	0,99
55	0,04	0,08	0,25	5,63	0,30	1,00
60	0,04	0,07	0,25	7,34	0,32	1,00
65	0,04	0,07	0,24	7,17	0,33	1,01
70	0,04	0,07	0,23	5,14	0,34	1,02
75	0,04	0,06	0,23	3,54	0,35	1,05
80	0,05	0,06	0,24	2,36	0,37	1,07
85	0,05	0,07	0,24	1,59	0,38	1,09
90	0,04	0,07	0,26	1,22	0,40	1,12
95	0,04	0,07	0,56	1,03	0,47	1,21
100	0,03	0,08	1,12	0,97	0,73	1,33
105	0,03	0,08	2,32	0,91	1,01	1,35
110	0,03	0,14	4,17	0,83	1,26	1,32
115	0,07	0,22	5,89	0,76	1,48	1,34
120	0,11	0,32	7,47	0,70	1,52	1,37
125	0,17	0,44	7,27	0,63	1,69	1,49
130	0,22	0,50	5,27	0,51	1,92	1,61
135	0,23	0,65	3,63	0,39	2,13	1,60
140	0,23	0,85	2,34	0,32	2,32	1,60

Procentuální (jednotkové) pětiminutové úhrny pro tvary šestihodinových srážek A–F (%)						
Čas (min)	A	B	C	D	E	F
145	0,22	1,17	1,54	0,26	2,32	1,75
150	0,29	1,57	1,22	0,24	2,27	1,92
155	0,46	2,34	0,98	0,24	2,50	2,15
160	0,92	3,30	0,81	0,24	2,77	2,61
165	1,83	4,56	0,72	0,23	3,09	2,97
170	5,71	6,60	0,71	0,22	3,80	3,34
175	10,21	8,21	0,69	0,22	4,39	3,59
180	14,47	9,69	0,71	0,22	4,88	3,28
185	17,90	10,1	0,77	0,22	5,17	2,92
190	14,11	8,32	0,88	0,23	4,66	2,55
195	8,82	6,67	1,15	0,23	4,10	2,13
200	5,49	5,40	1,41	0,23	3,63	1,94
205	2,71	4,07	1,83	0,23	3,08	1,72
210	1,68	3,33	2,87	0,23	2,80	1,53
215	1,10	2,65	3,79	0,23	2,51	1,55
220	0,91	2,00	4,73	0,27	2,27	1,58
225	0,92	1,69	5,33	0,35	2,25	1,51
230	0,89	1,55	4,53	0,45	2,24	1,40
235	0,81	1,40	3,60	0,57	2,09	1,34
240	0,72	1,24	2,69	0,65	1,88	1,29
245	0,61	1,02	1,70	0,71	1,78	1,30
250	0,48	0,78	1,31	0,77	1,67	1,31
255	0,34	0,77	0,96	0,85	1,57	1,23
260	0,38	0,82	0,66	0,95	1,50	1,11
265	0,61	0,77	0,62	1,07	1,40	1,05
270	0,69	0,69	0,61	1,45	1,22	1,02
275	0,58	0,60	0,59	2,40	1,03	1,01
280	0,47	0,48	0,58	3,26	0,83	1,01
285	0,34	0,35	0,57	4,42	0,66	1,01
290	0,23	0,32	0,57	5,46	0,63	1,02
295	0,24	0,34	0,59	4,72	0,61	1,04
300	0,25	0,32	0,59	3,57	0,59	1,05

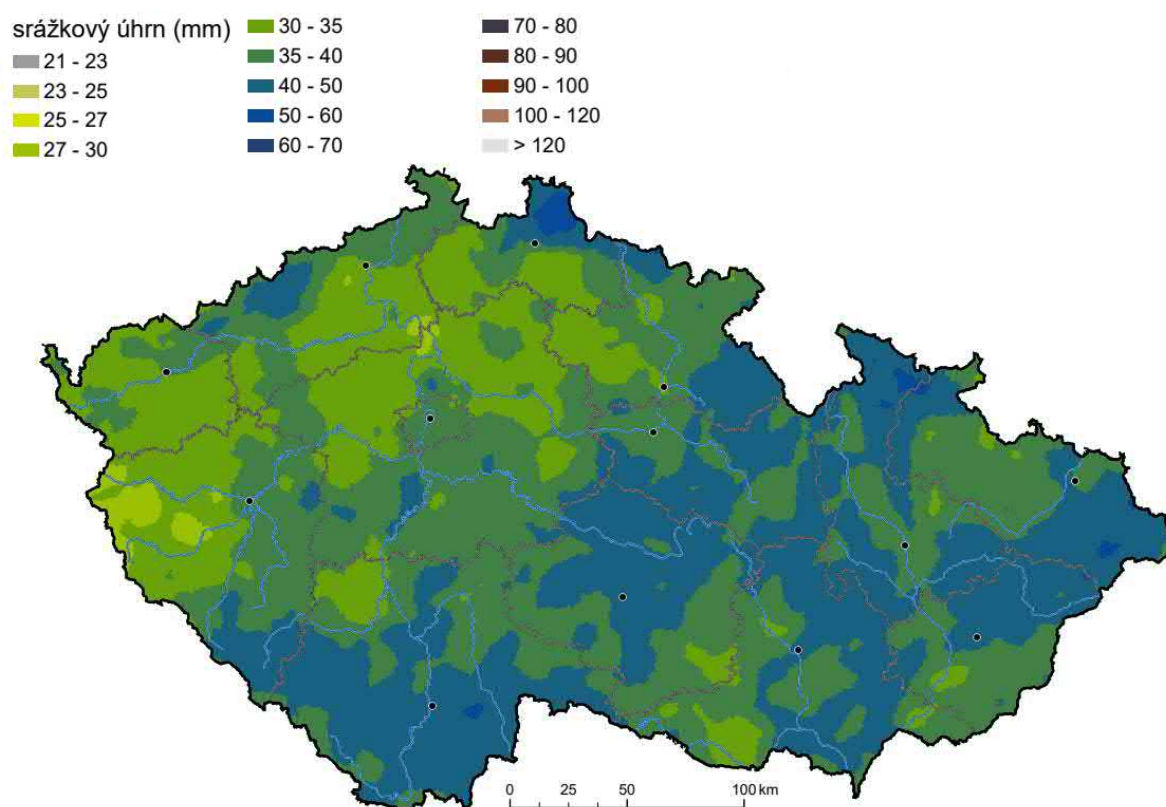
Procentuální (jednotkové) pětiminutové úhrny pro tvary šestihodinových srážek A–F (%)						
Čas (min)	A	B	C	D	E	F
305	0,24	0,30	0,57	2,57	0,57	1,06
310	0,24	0,29	0,55	1,50	0,54	1,06
315	0,25	0,28	0,52	1,08	0,50	1,06
320	0,27	0,26	0,51	1,04	0,46	1,05
325	0,30	0,24	0,52	1,07	0,42	1,03
330	0,30	0,22	0,51	1,00	0,39	1,02
335	0,29	0,20	0,49	0,82	0,37	1,01
340	0,26	0,18	0,44	0,70	0,34	0,99
345	0,20	0,15	0,39	0,63	0,30	0,98
350	0,14	0,12	0,32	0,54	0,25	0,92
355	0,09	0,08	0,26	0,45	0,19	0,81
360	0,05	0,06	0,22	0,38	0,15	0,72

8.2 Návrhové šestihodinové srážky

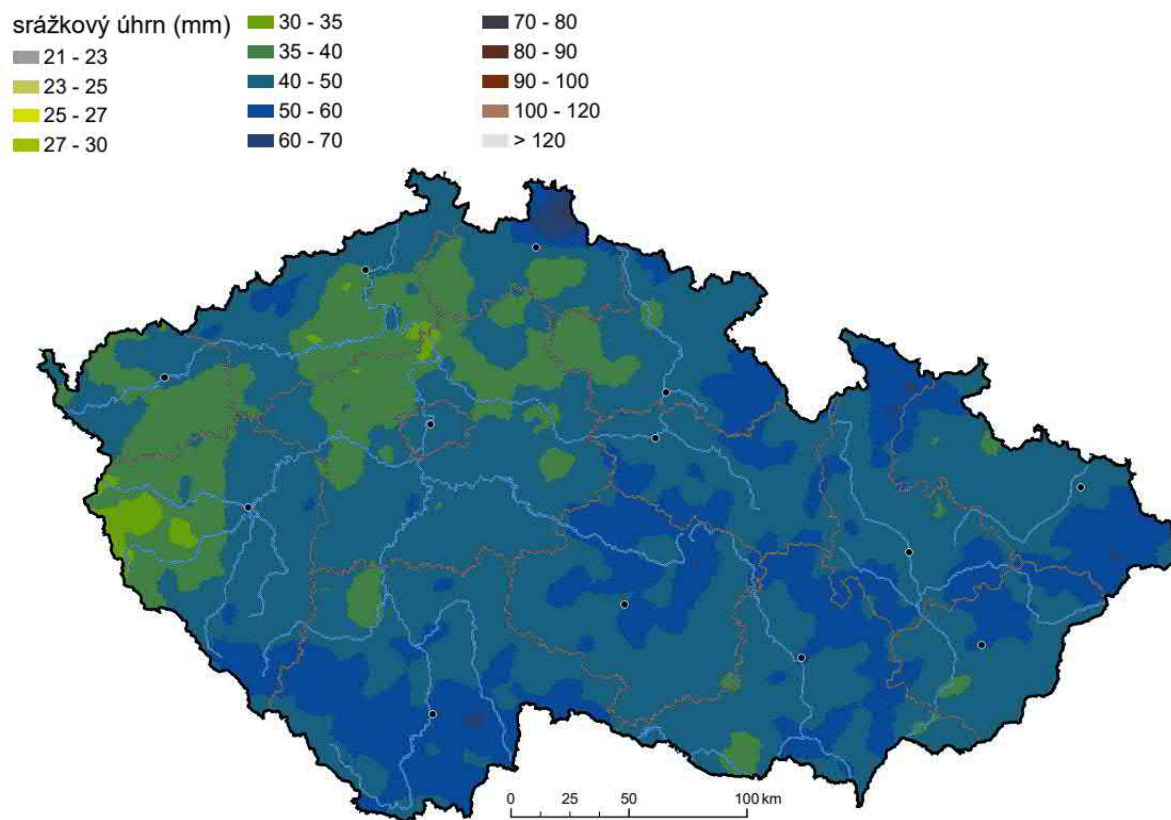
Návrhová šestihodinová srážka s dobou opakování 2 roky (mm)



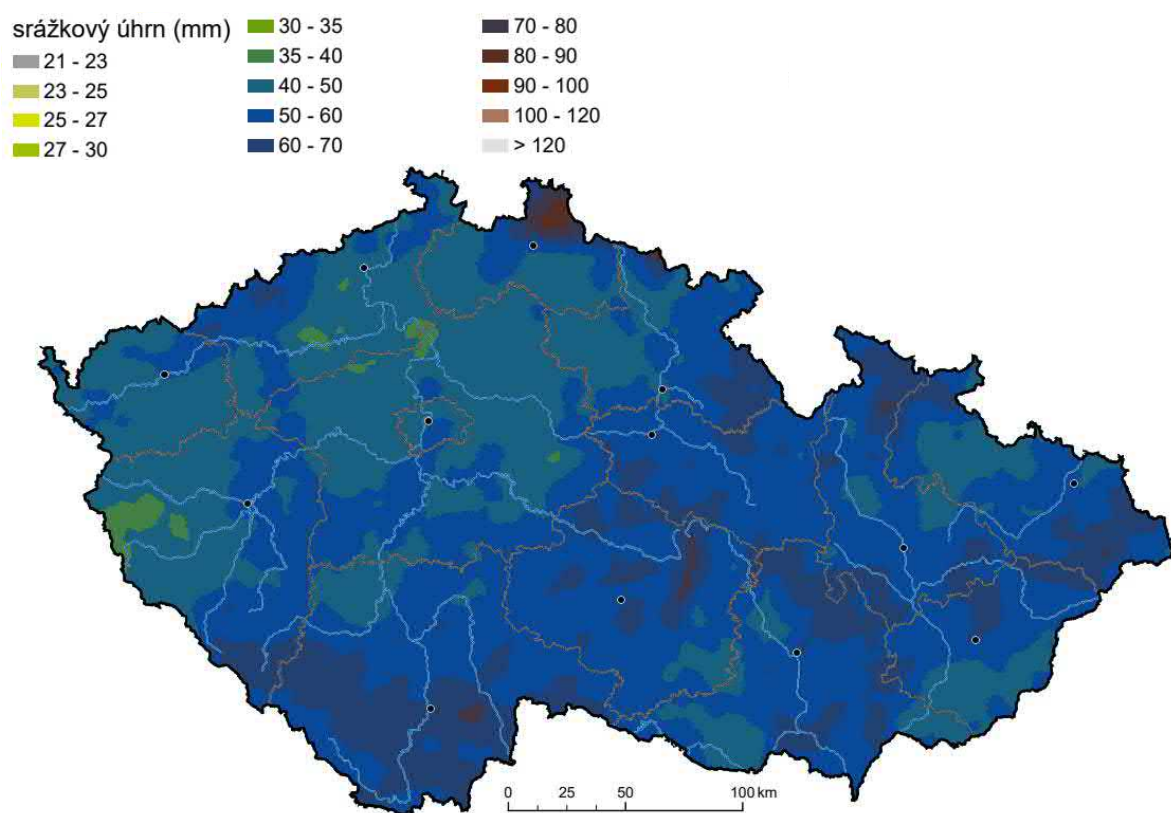
Návrhová šestihodinová srážka s dobou opakování 5 let (mm)



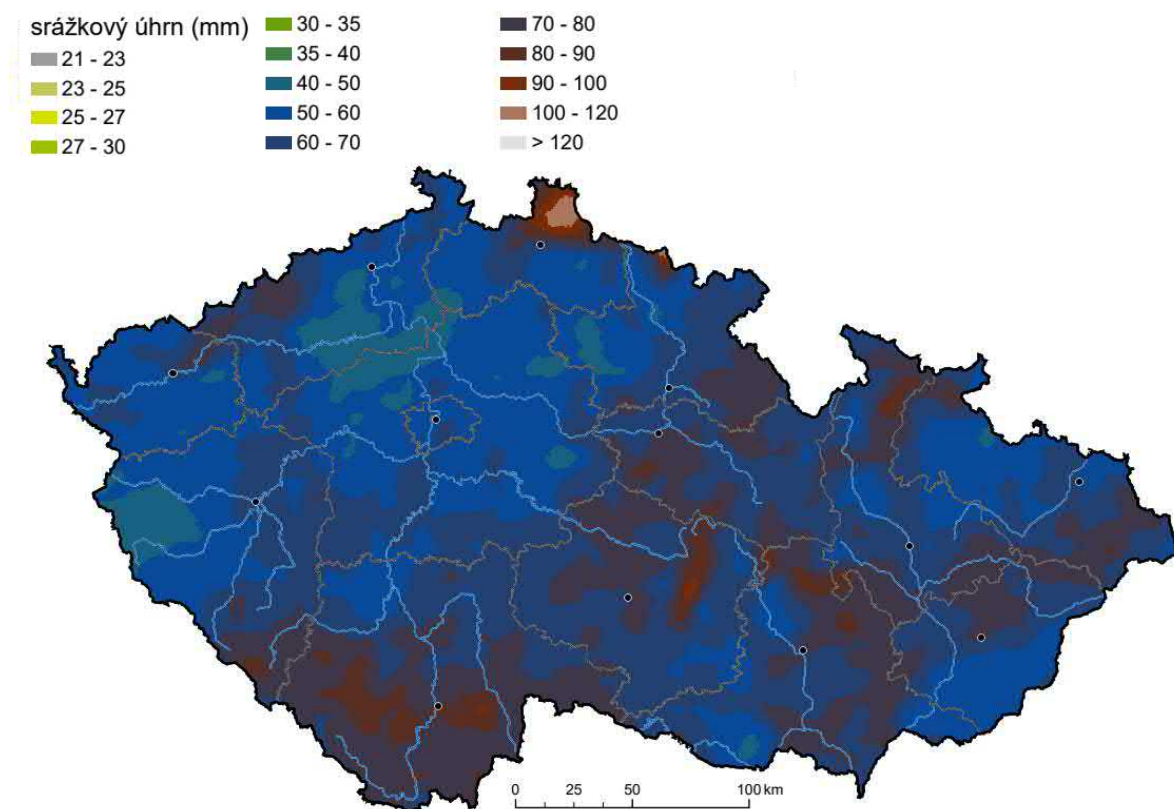
Návrhová šestihodinová srážka s dobou opakování 10 let (mm)



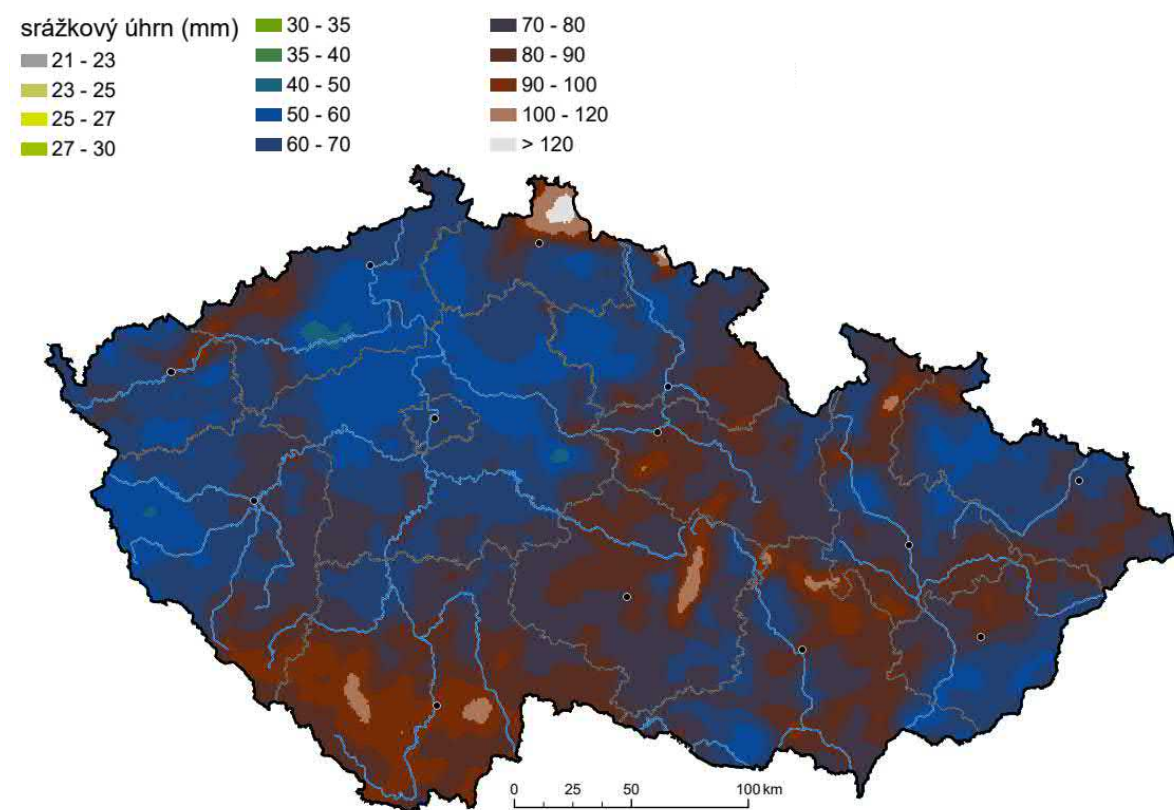
Návrhová šestihodinová srážka s dobou opakování 20 let (mm)



Návrhová šestihodinová srážka s dobou opakování 50 let (mm)

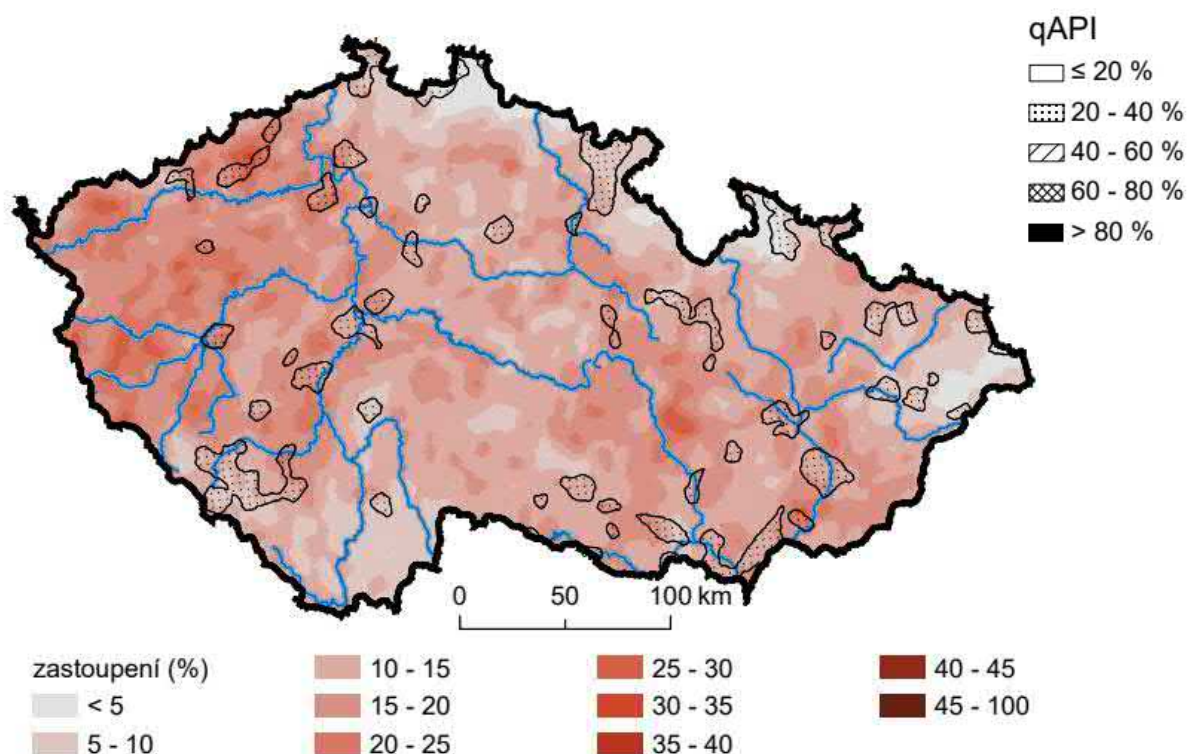


Návrhová šestihodinová srážka s dobou opakování 100 let (mm)

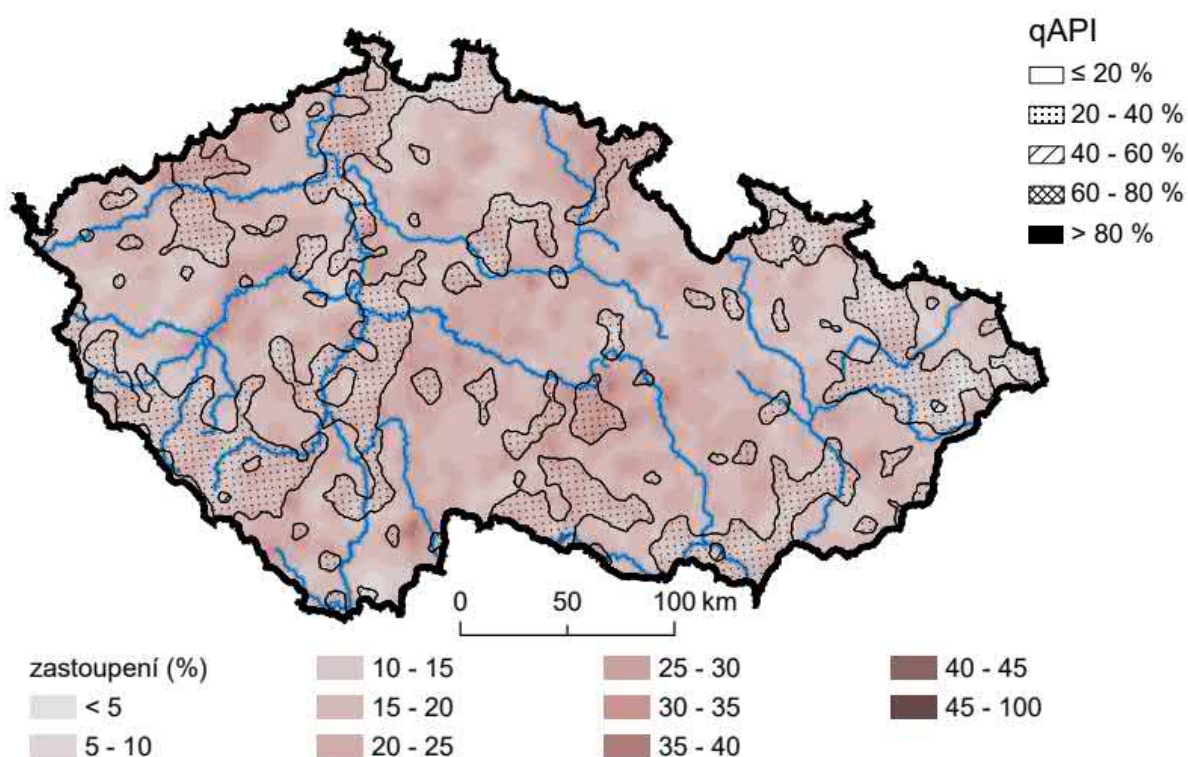


8.3 Pravděpodobnosti zastoupení tvarů šestihodinových srážek a stupeň možného extrémního nasycení

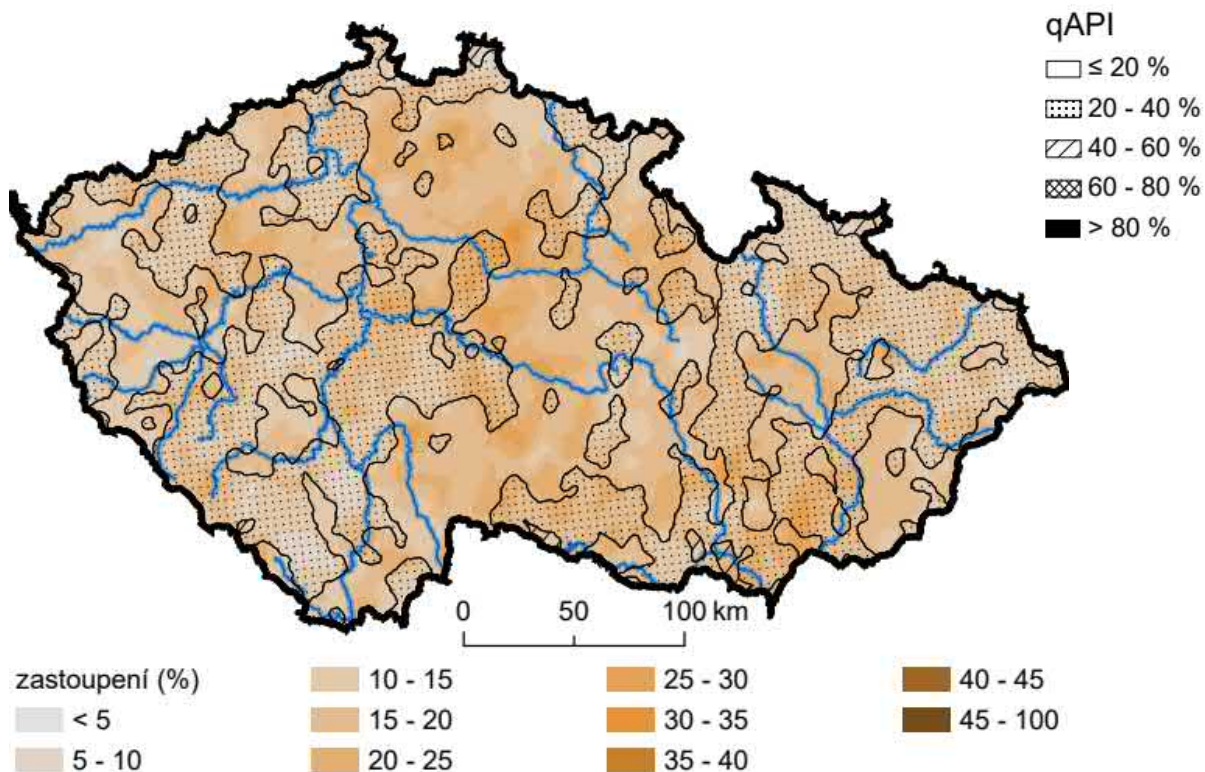
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru A pro dobu opakování 2 roky s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



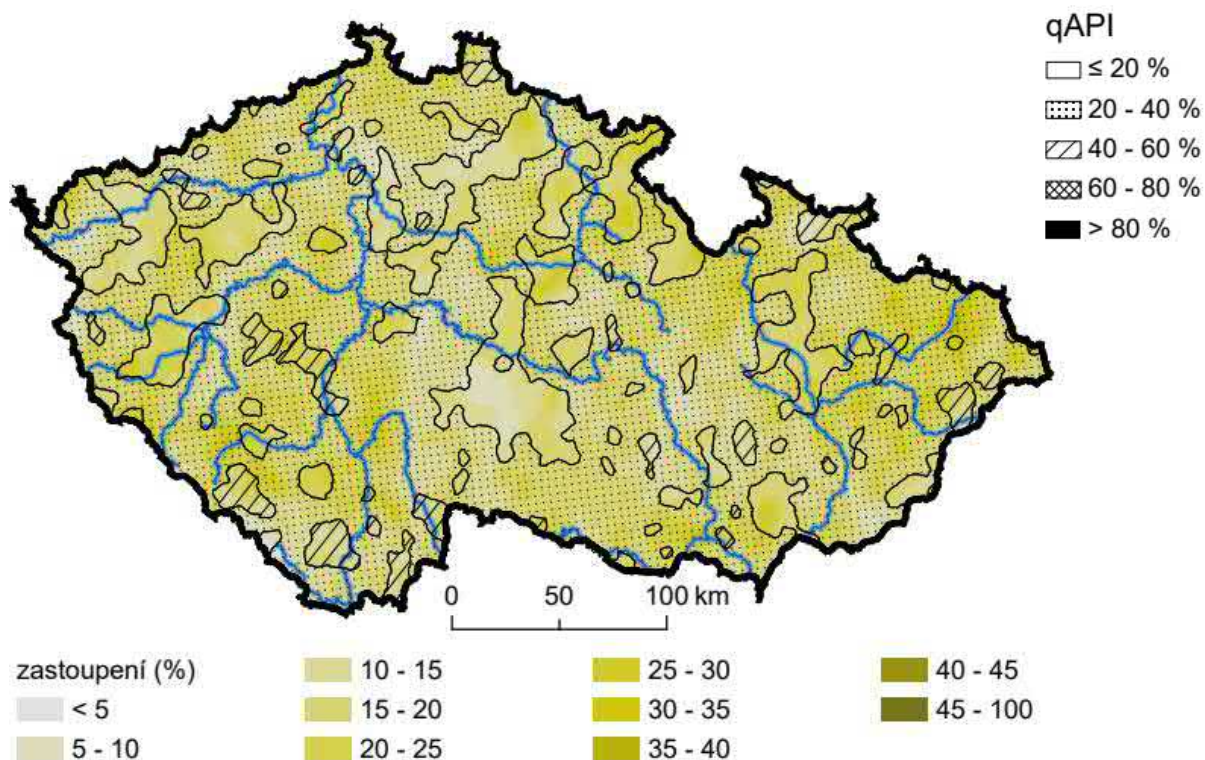
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru B pro dobu opakování 2 roky s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



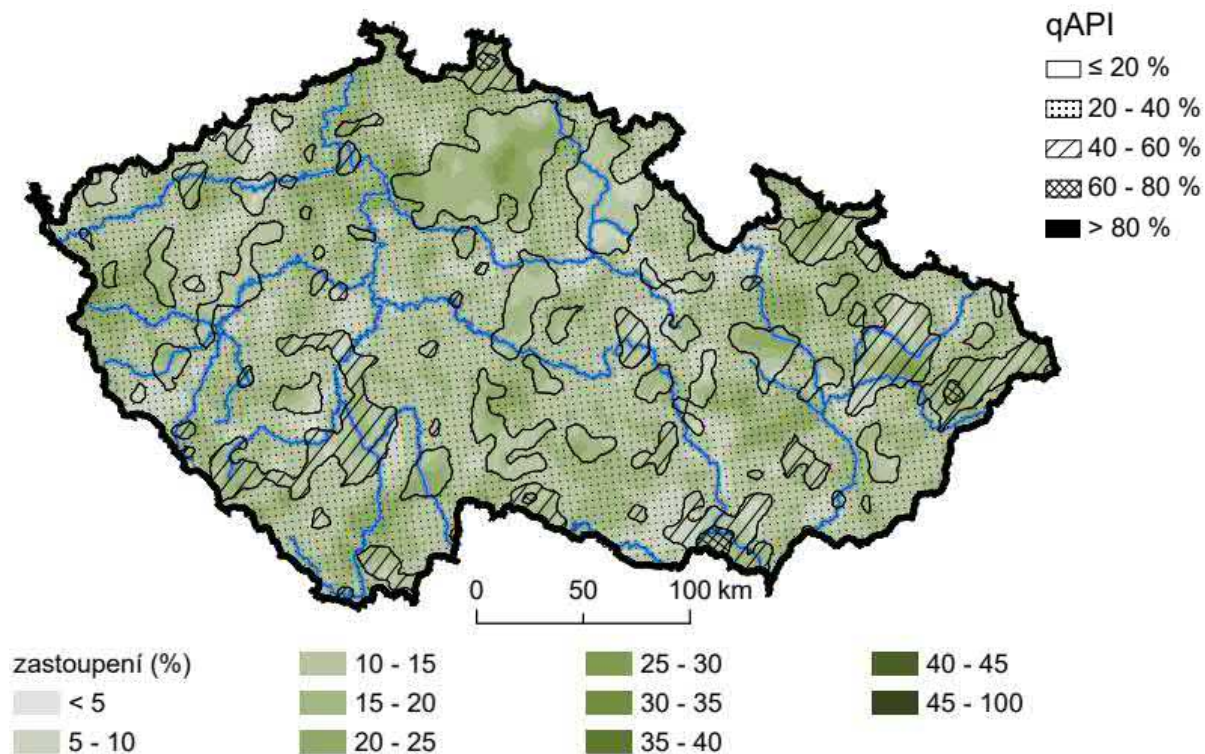
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru C pro dobu opakování 2 roky s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



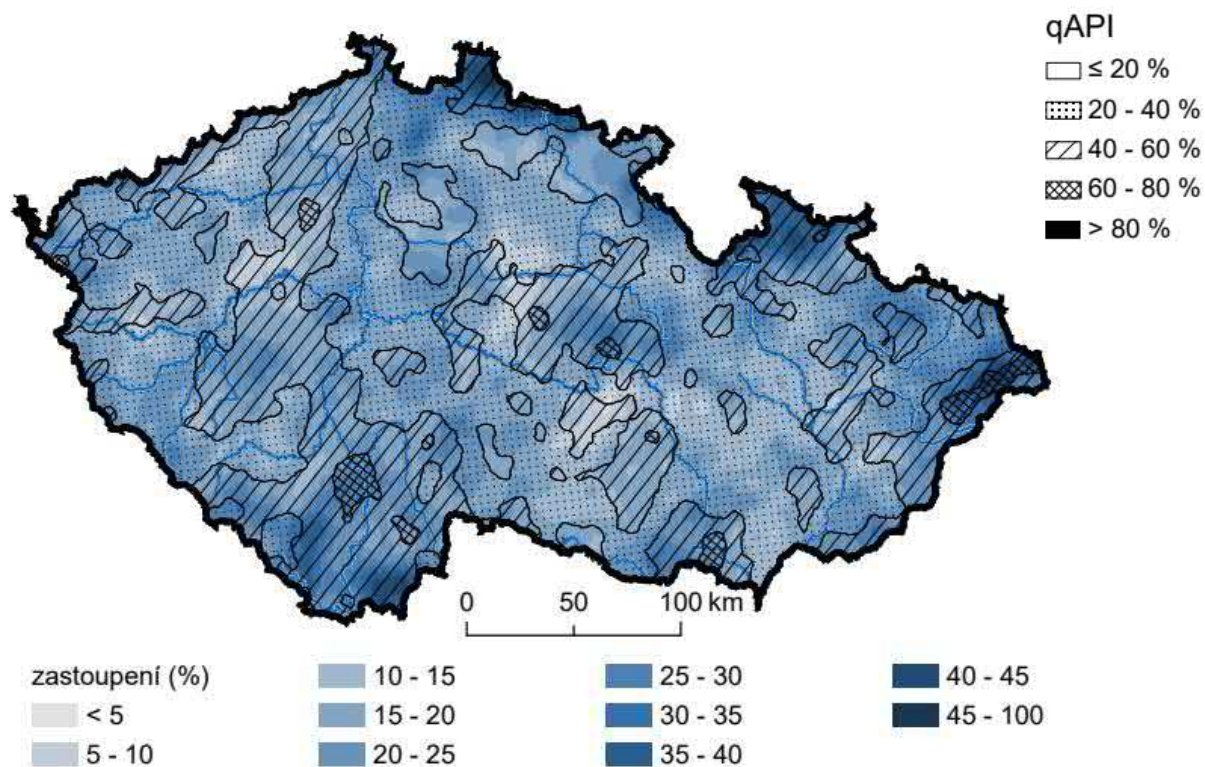
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru D pro dobu opakování 2 roky s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



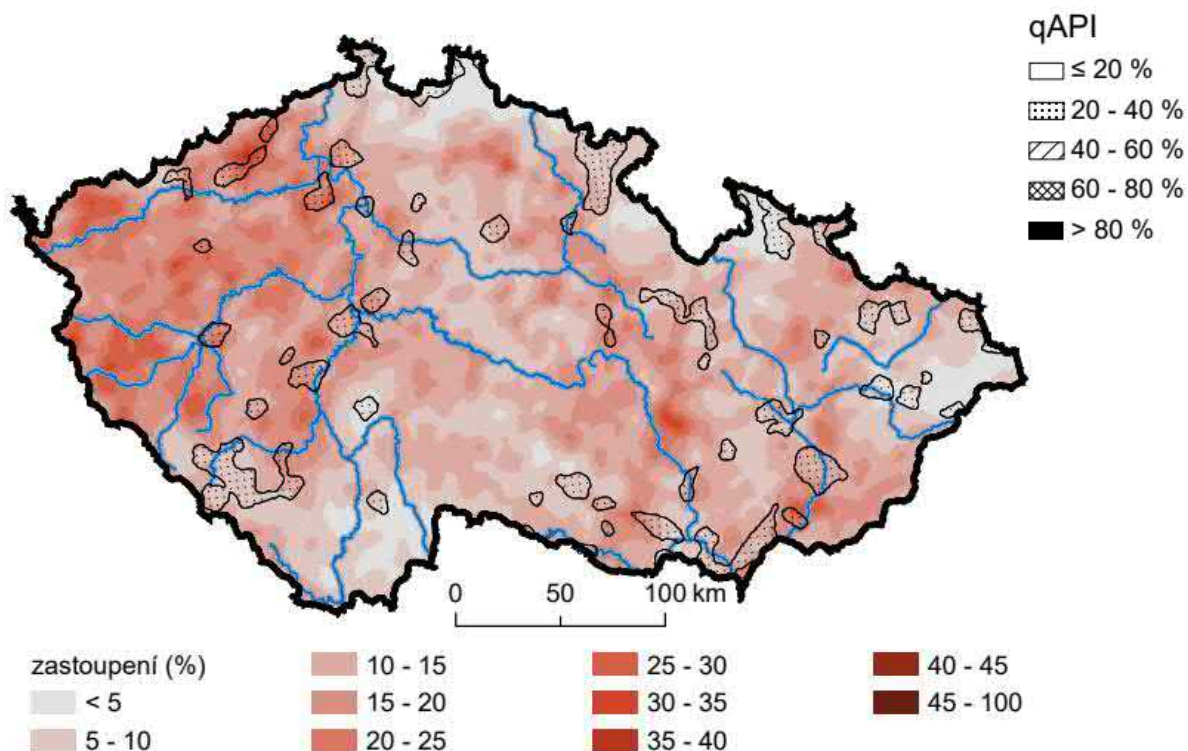
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru E pro dobu opakování 2 roky s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



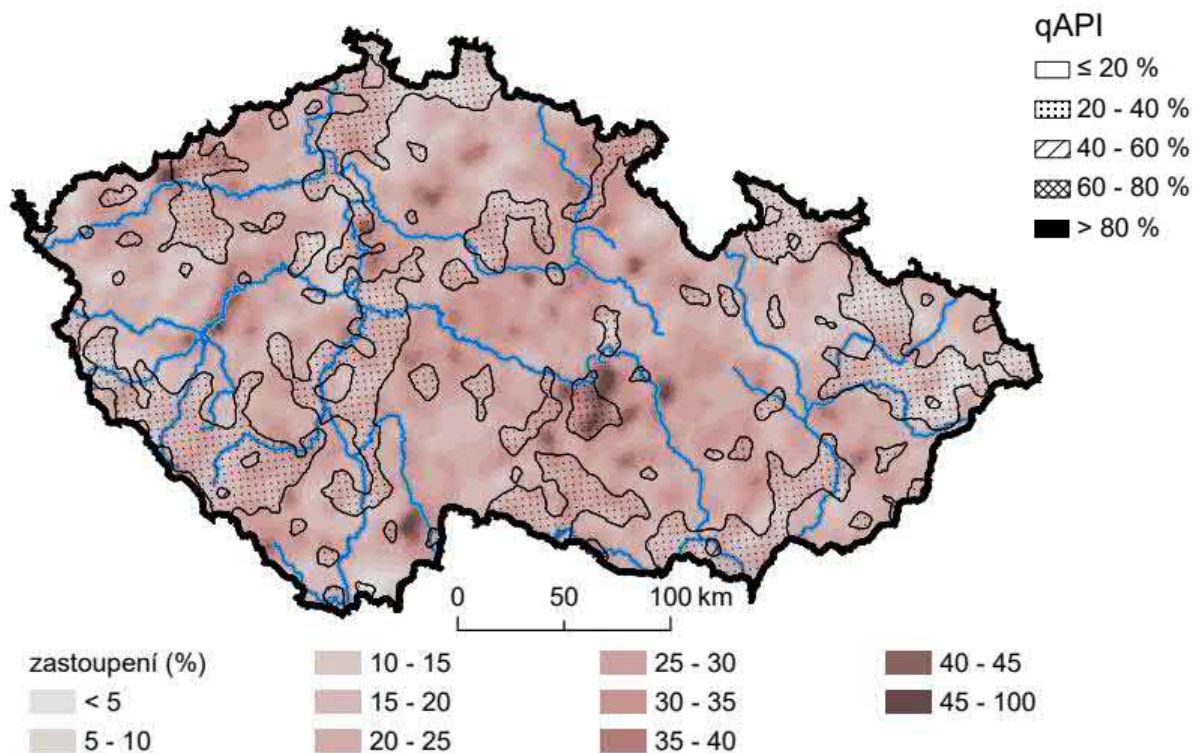
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru F pro dobu opakování 2 roky s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



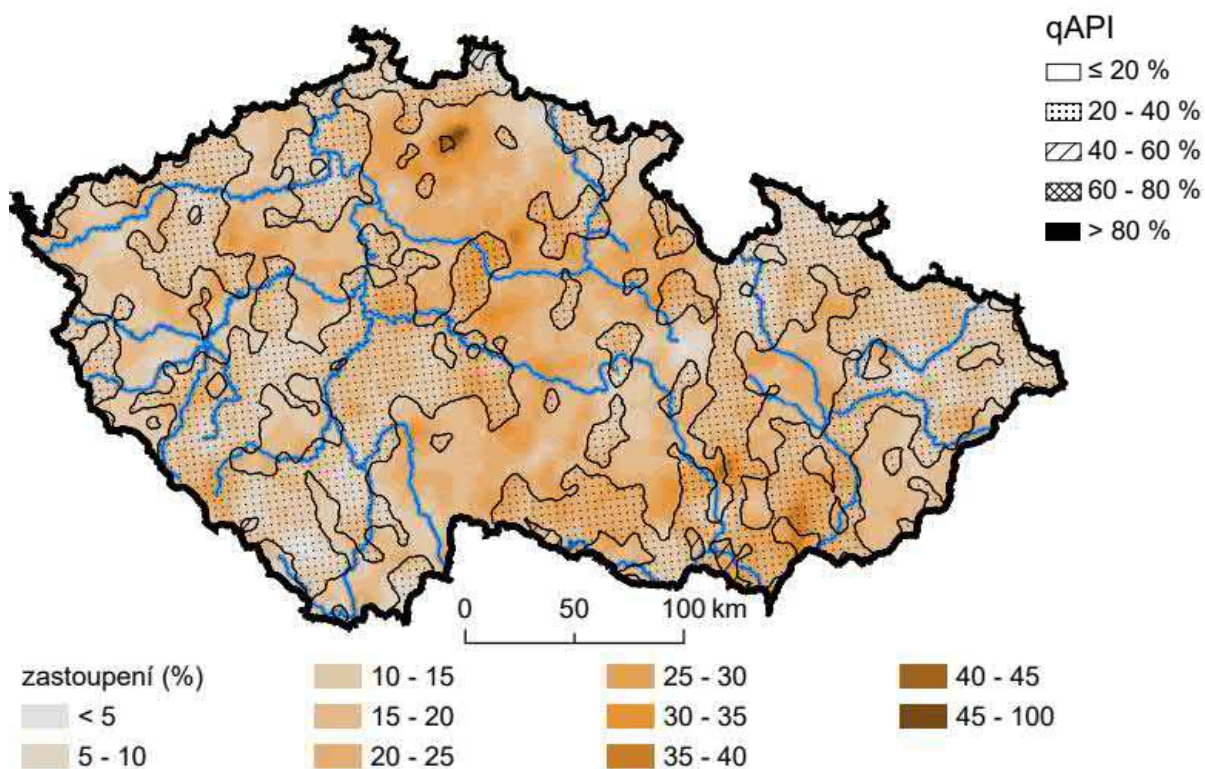
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru A pro dobu opakování 5 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



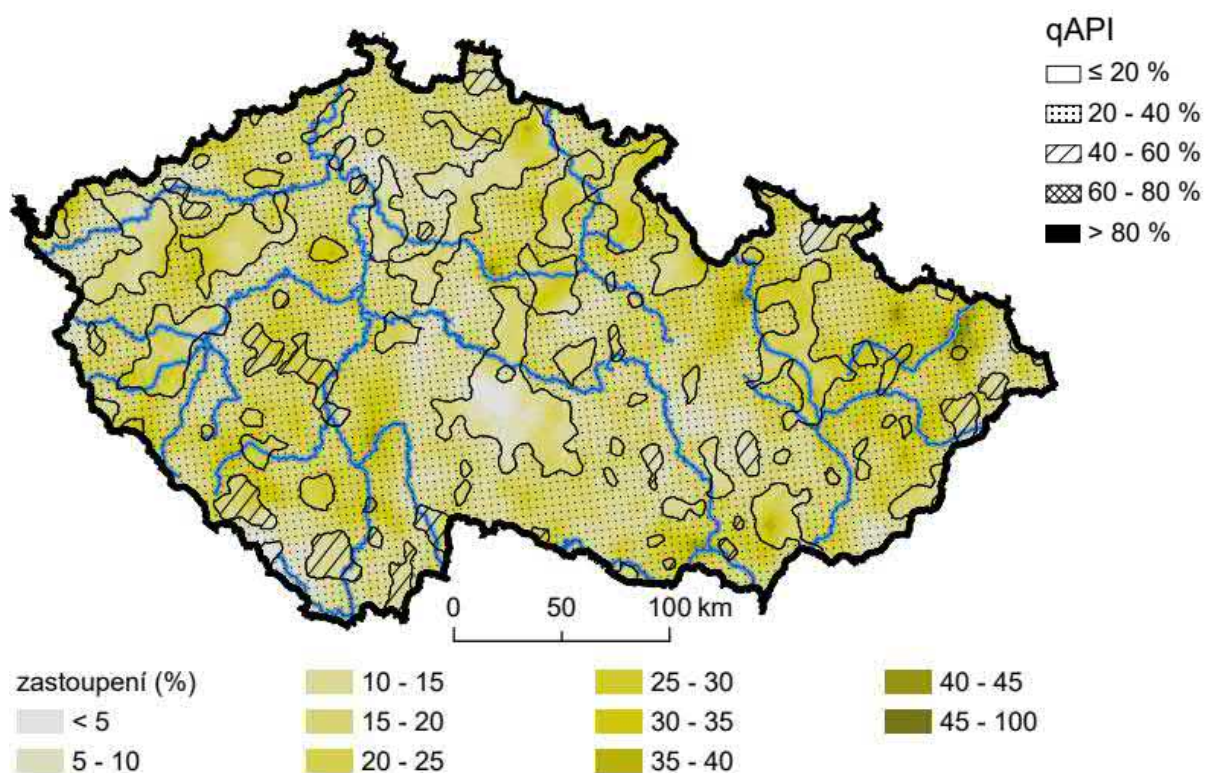
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru B pro dobu opakování 5 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



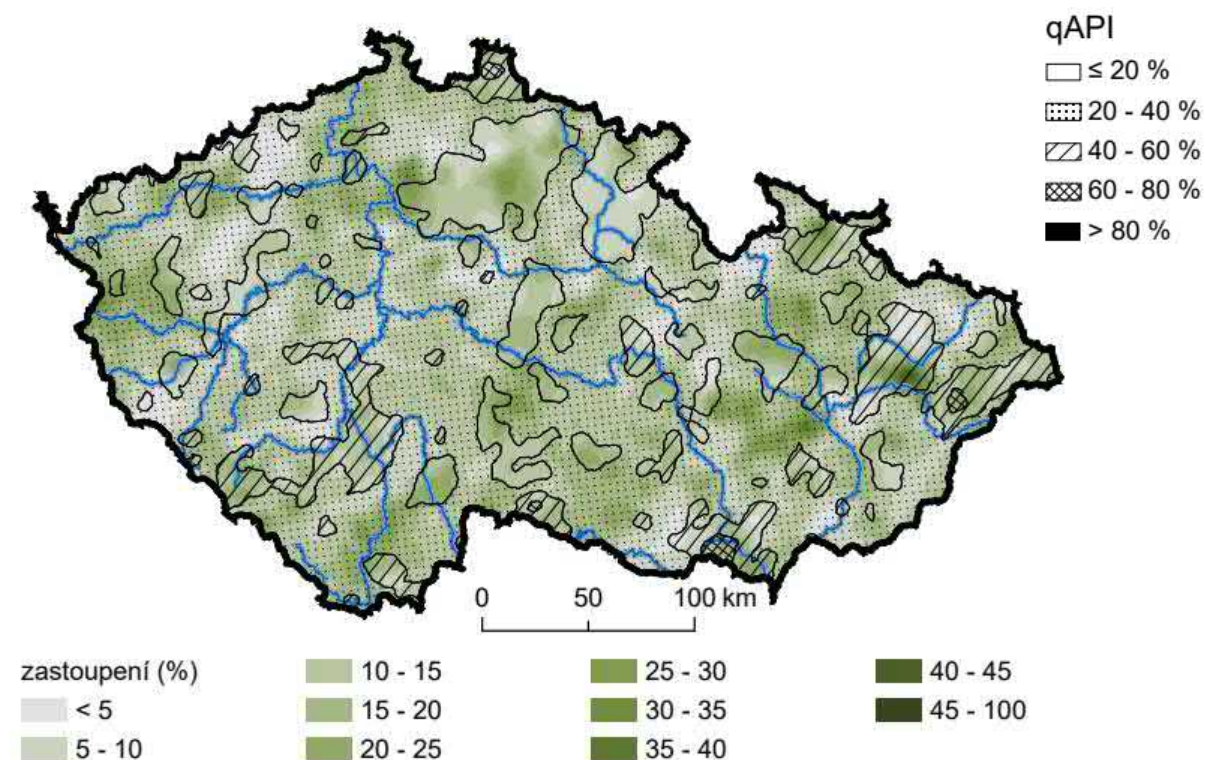
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru C pro dobu opakování 5 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



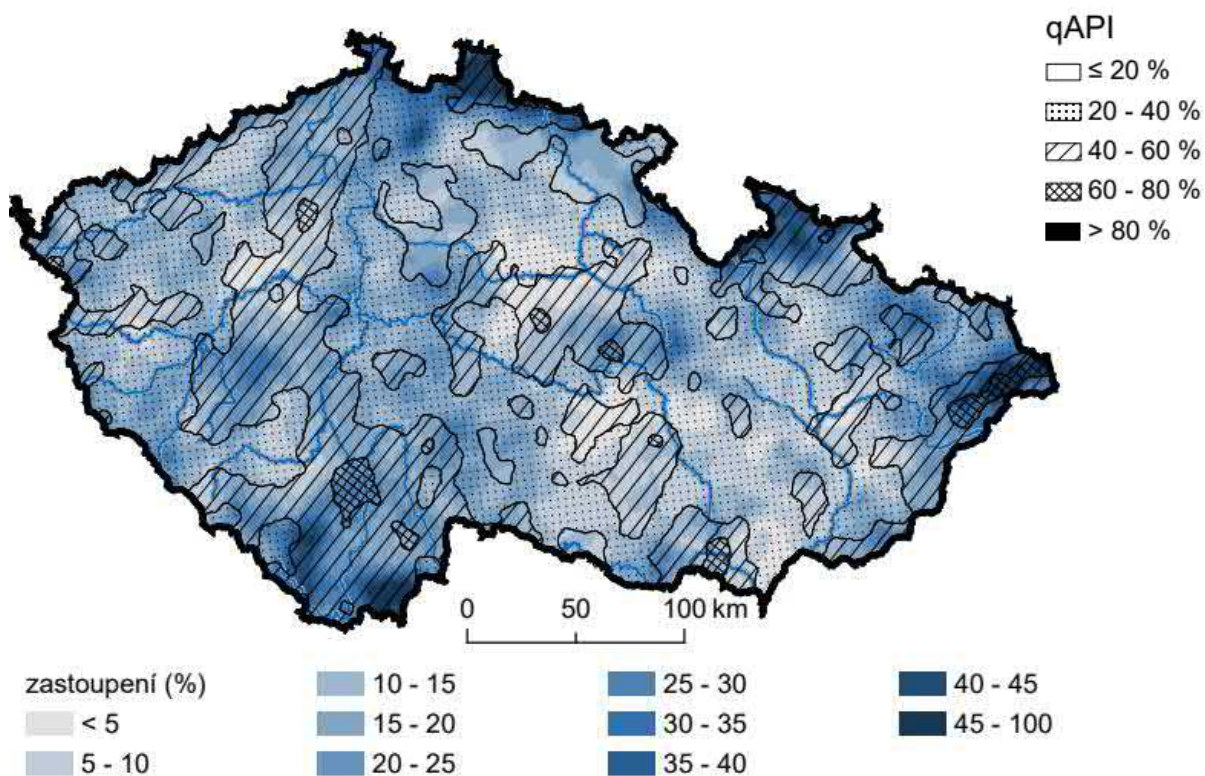
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru D pro dobu opakování 5 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



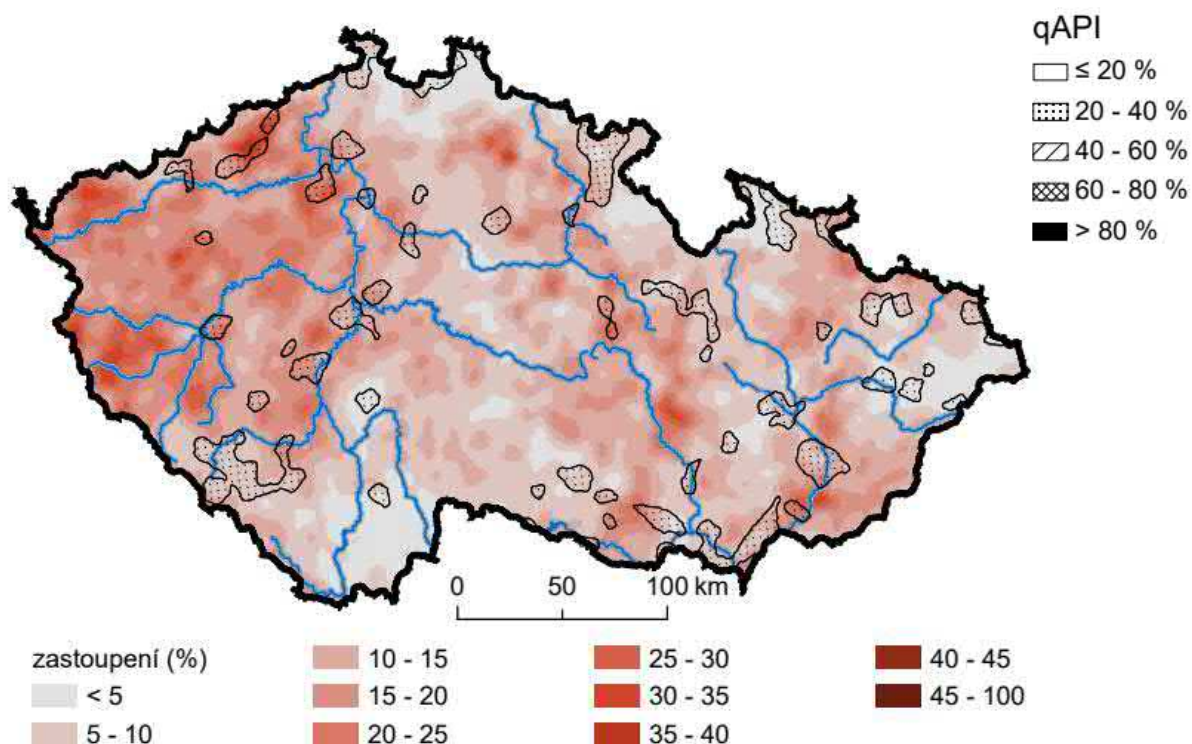
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru E pro dobu opakování 5 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



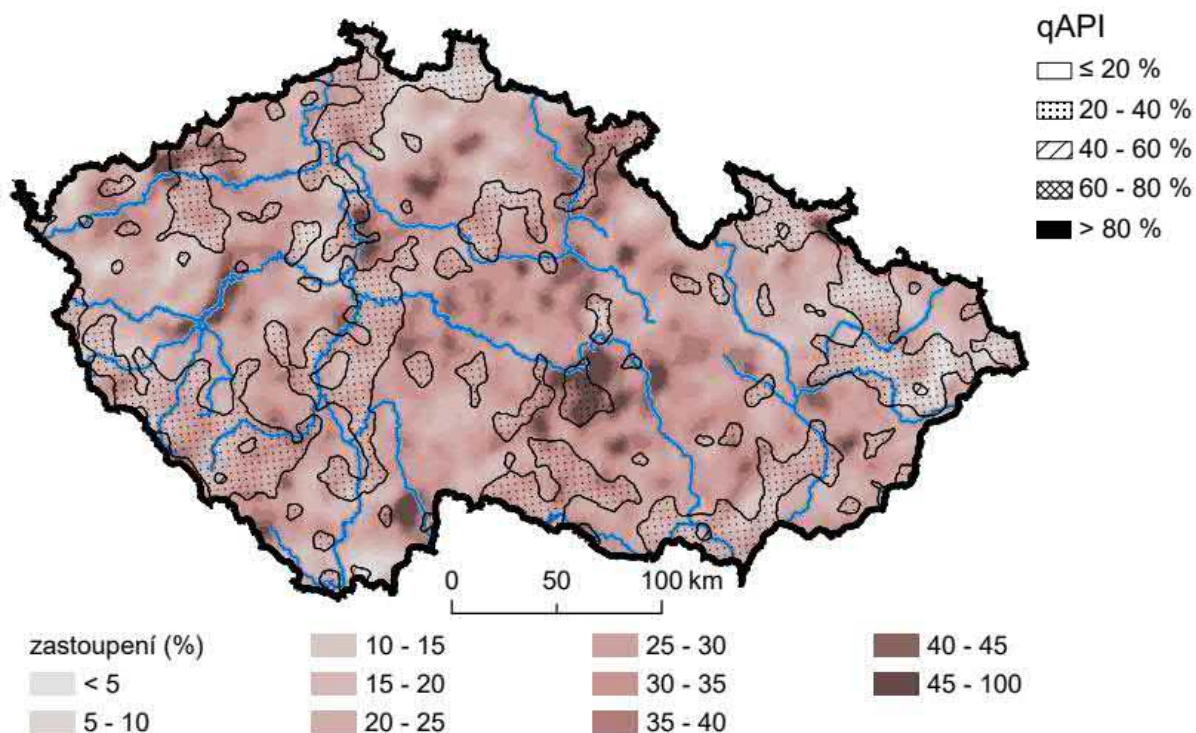
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru F pro dobu opakování 5 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



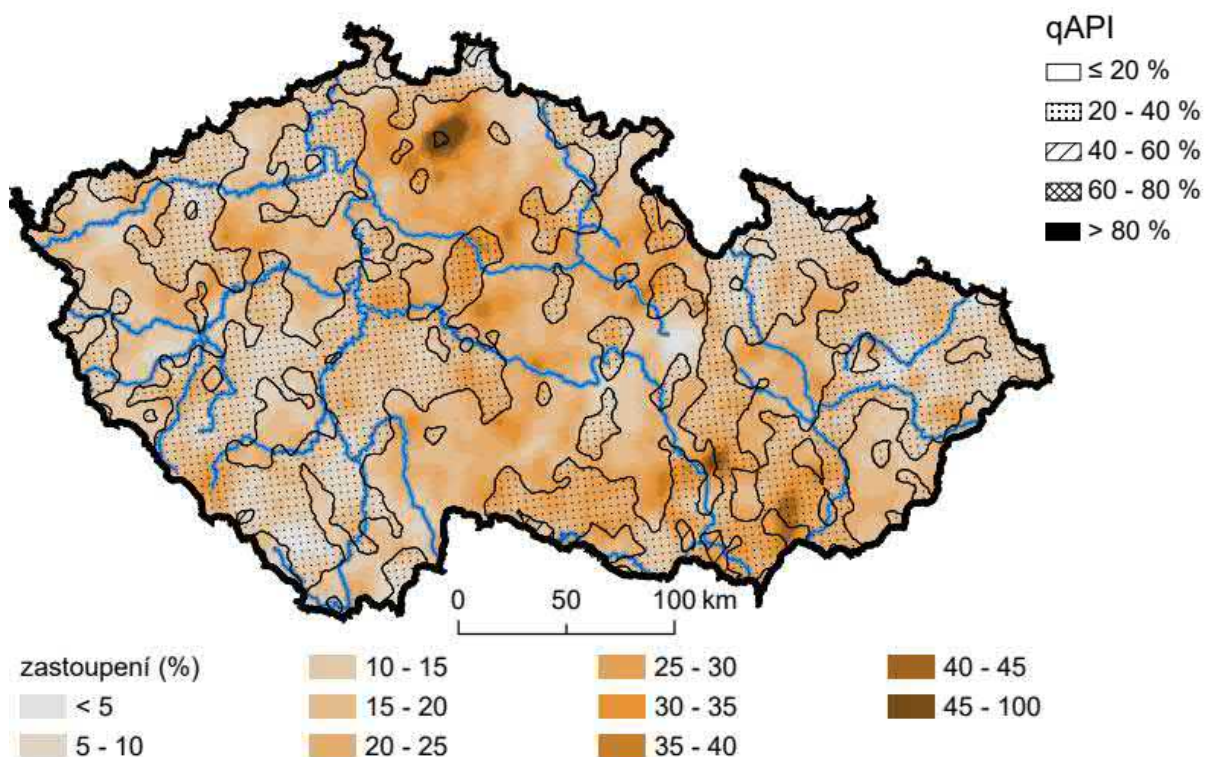
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru A pro dobu opakování 10 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



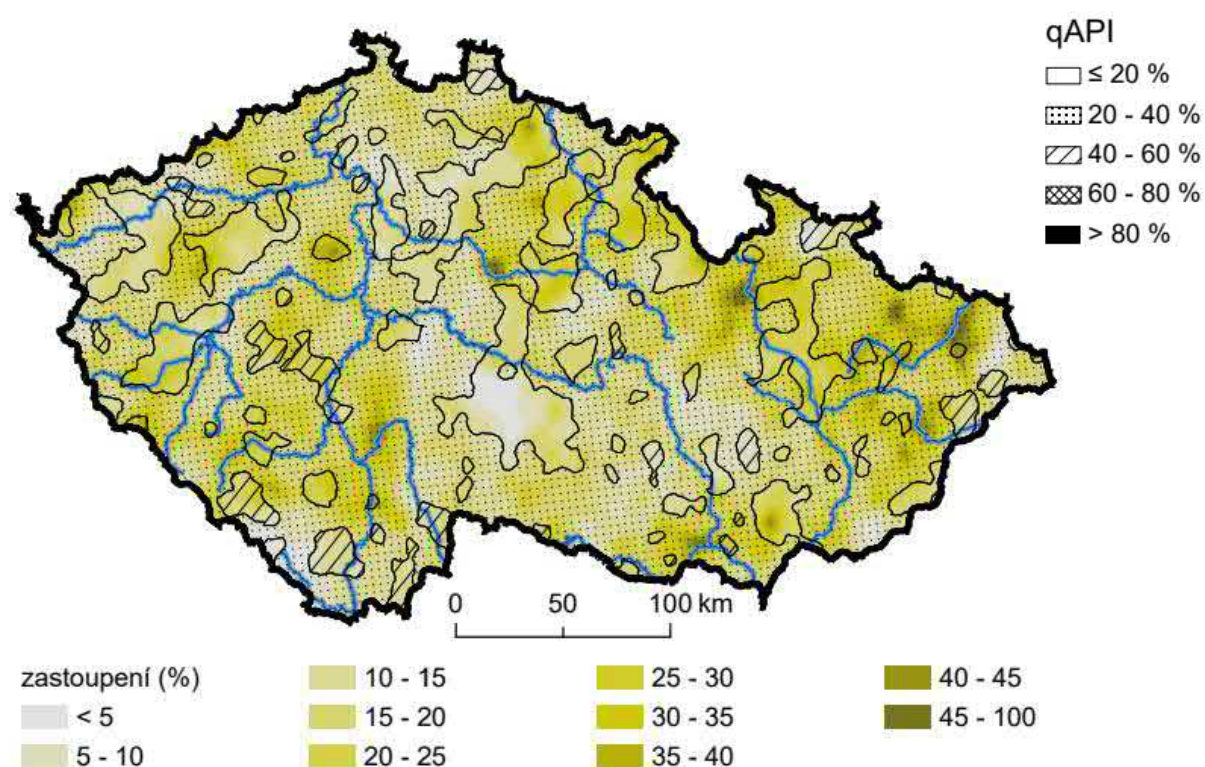
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru B pro dobu opakování 10 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



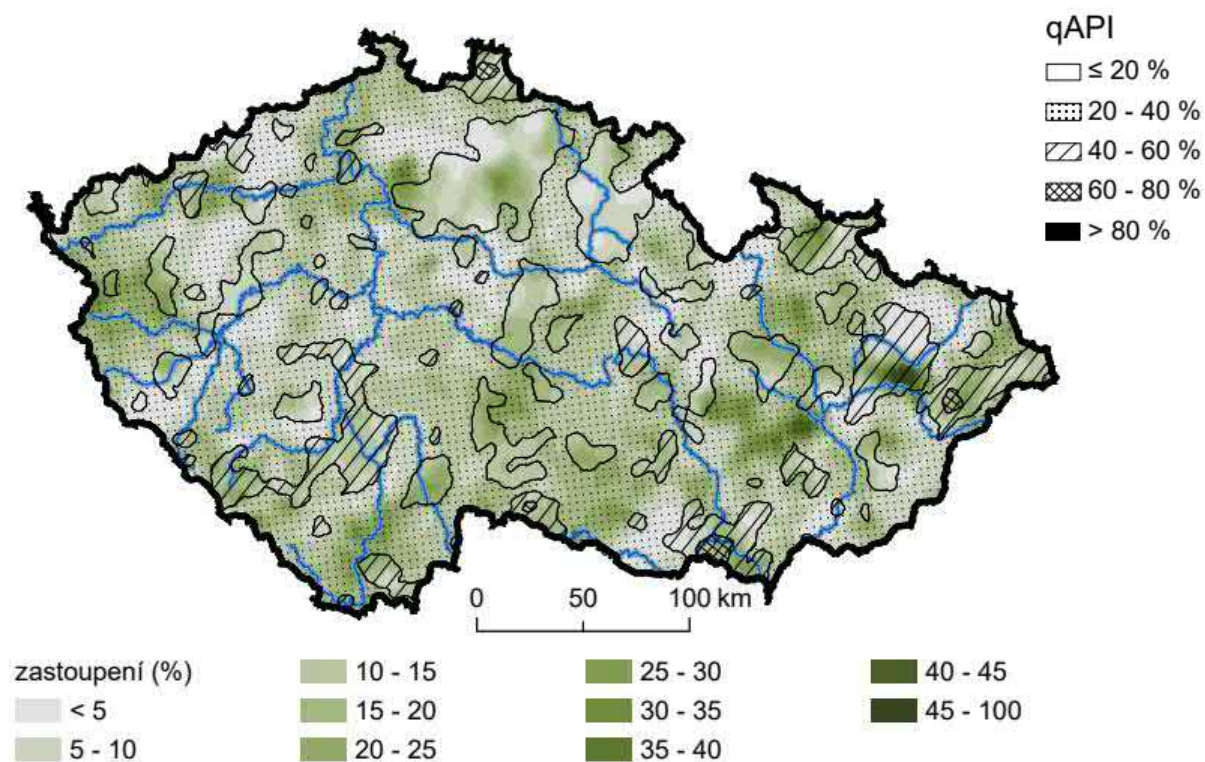
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru C pro dobu opakování 10 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



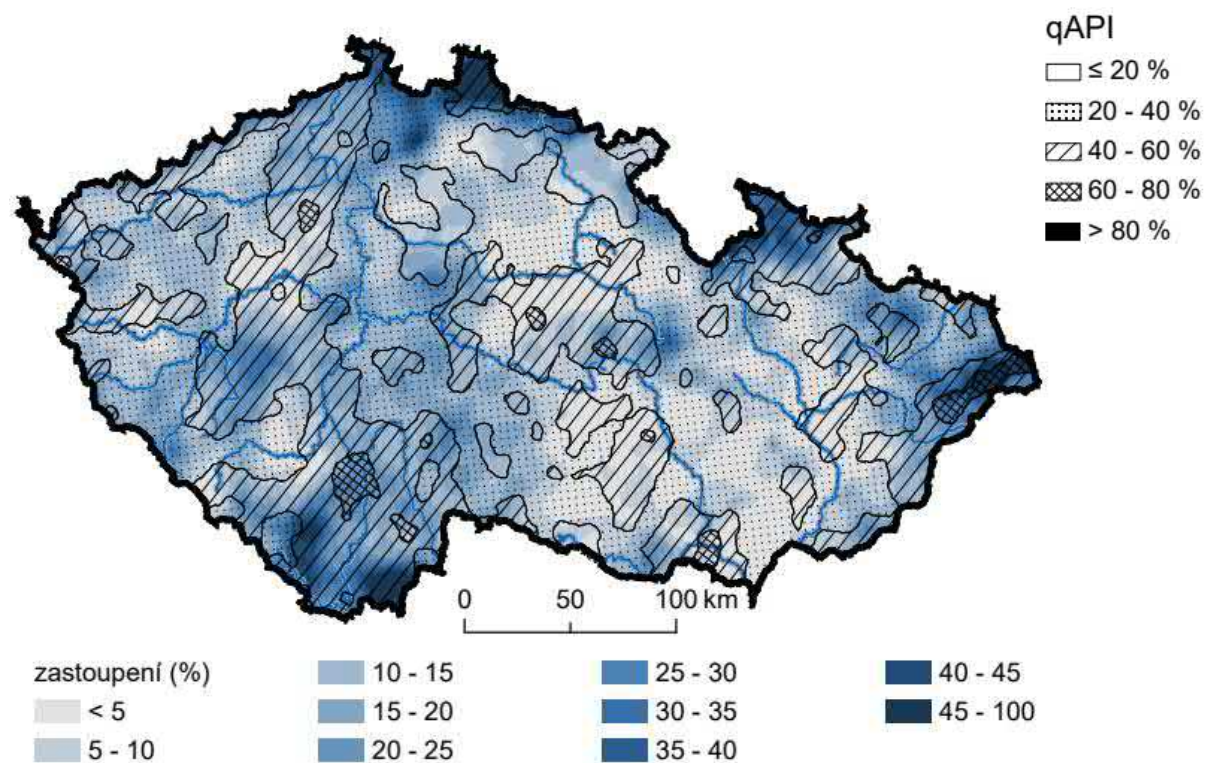
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru D pro dobu opakování 10 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



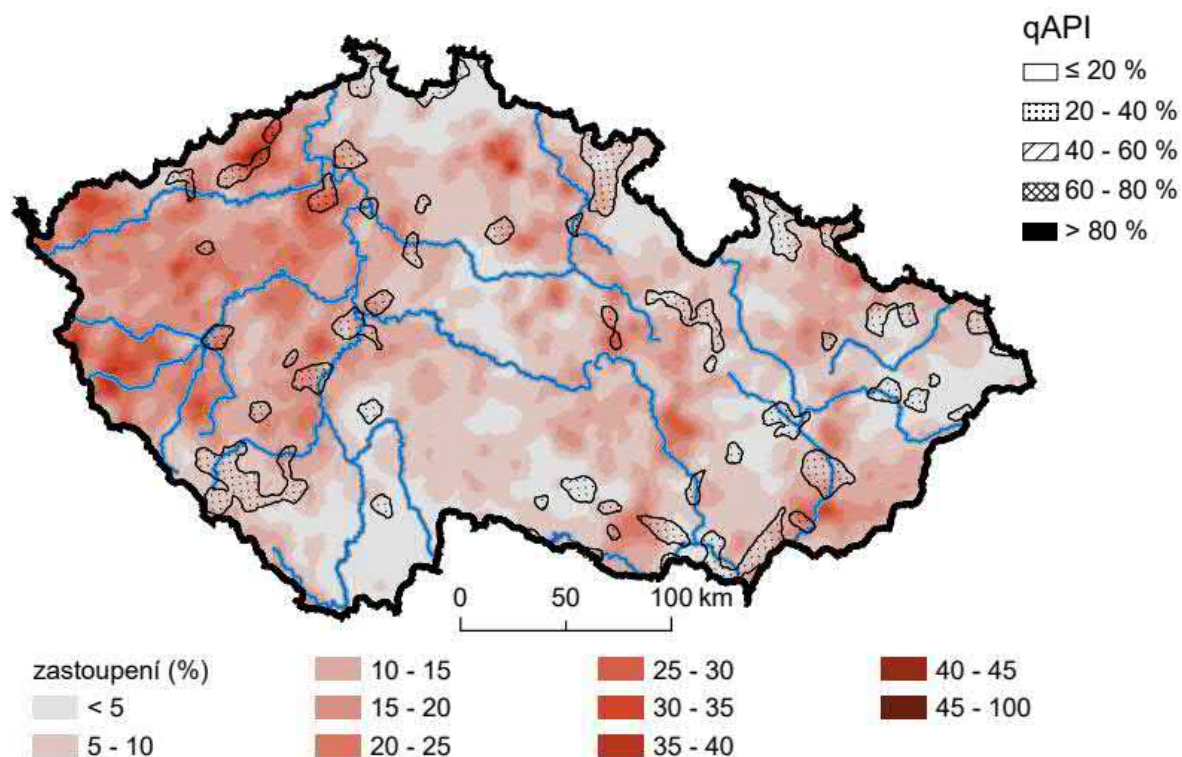
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru E pro dobu opakování 10 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



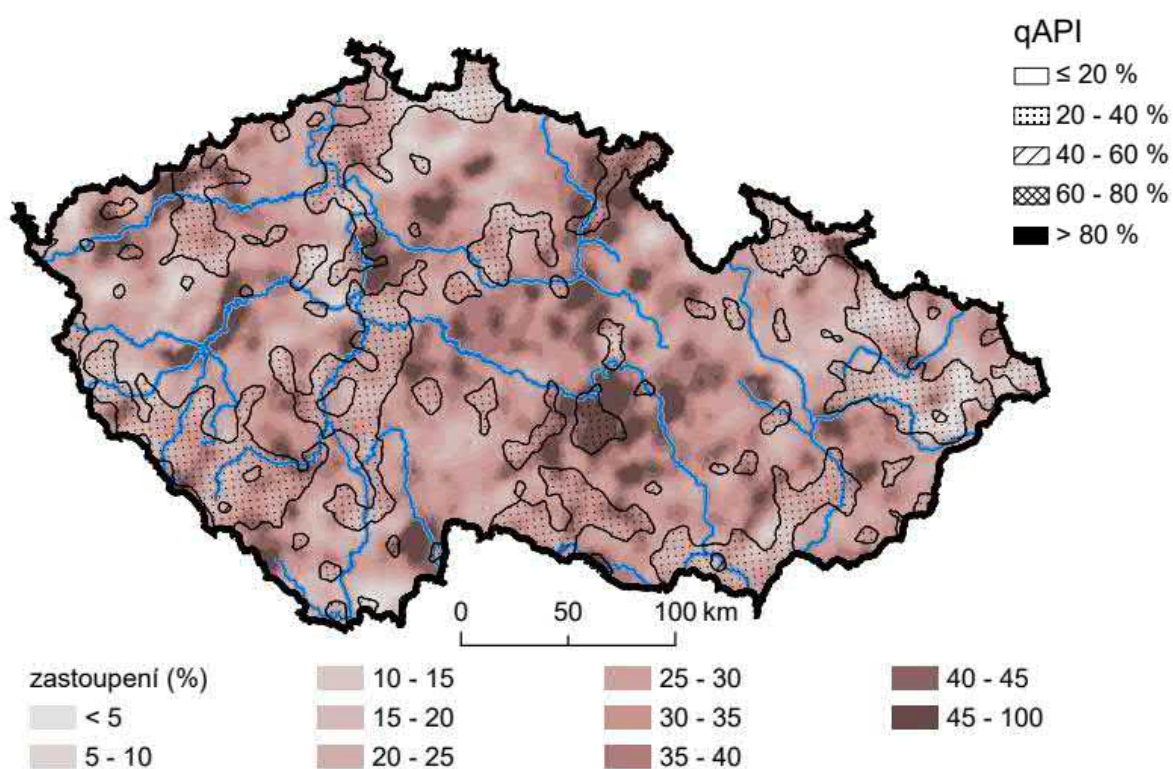
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru F pro dobu opakování 10 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



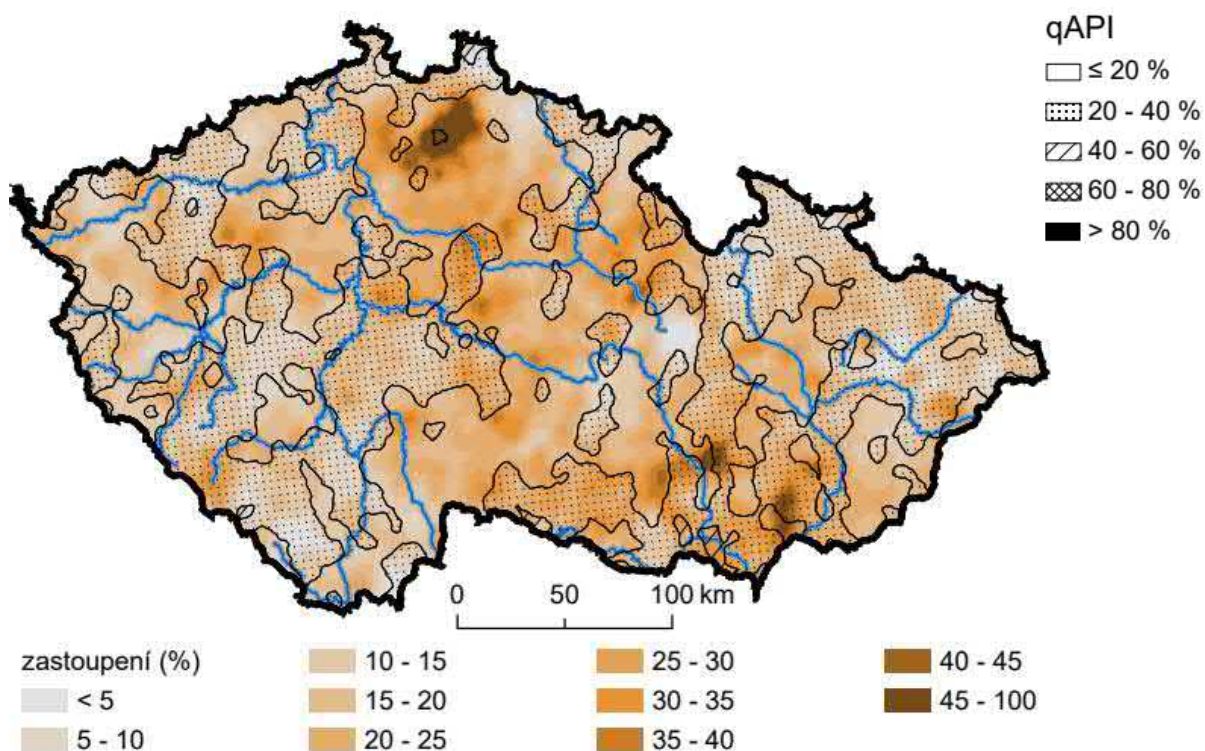
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru A pro dobu opakování 20 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



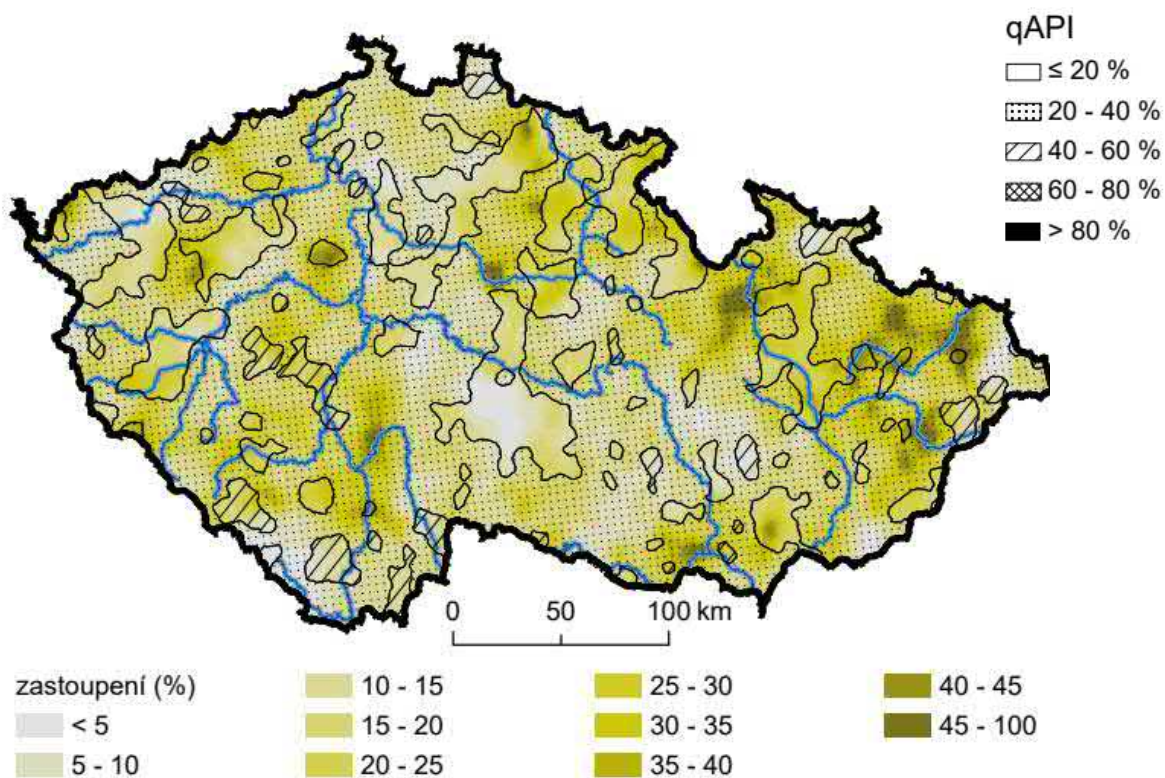
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru B pro dobu opakování 20 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



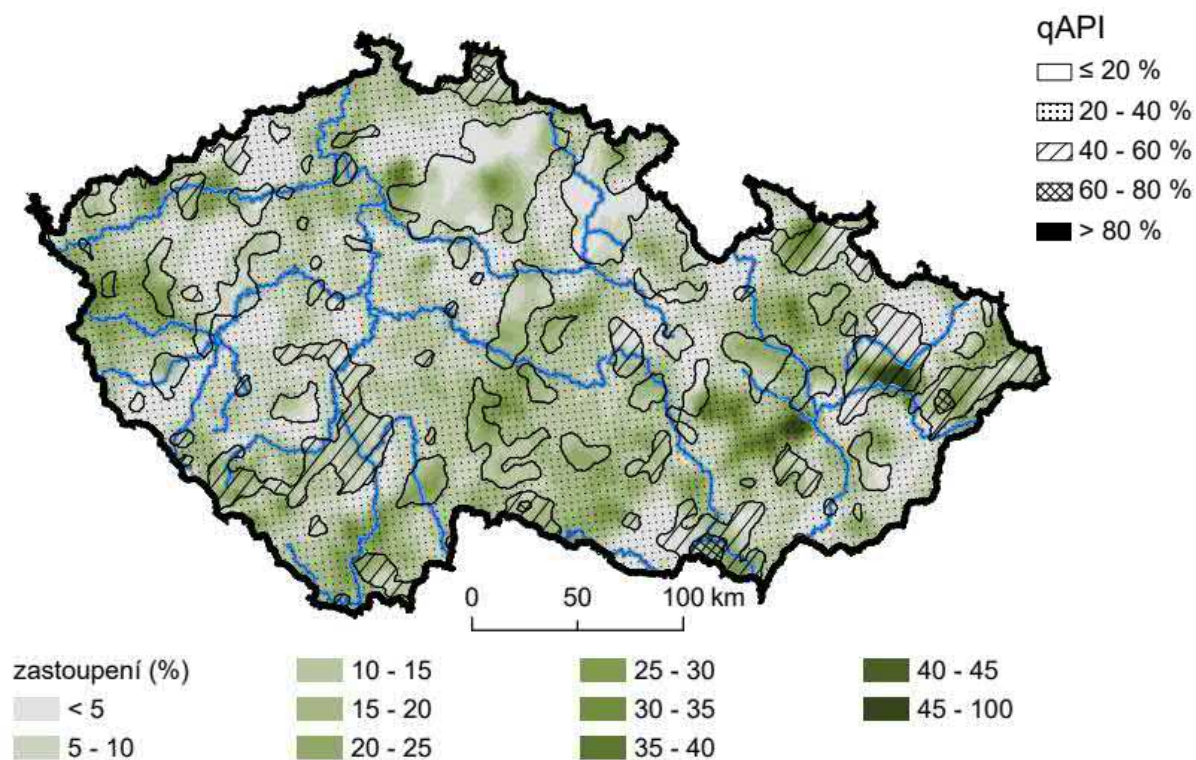
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru C pro dobu opakování 20 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



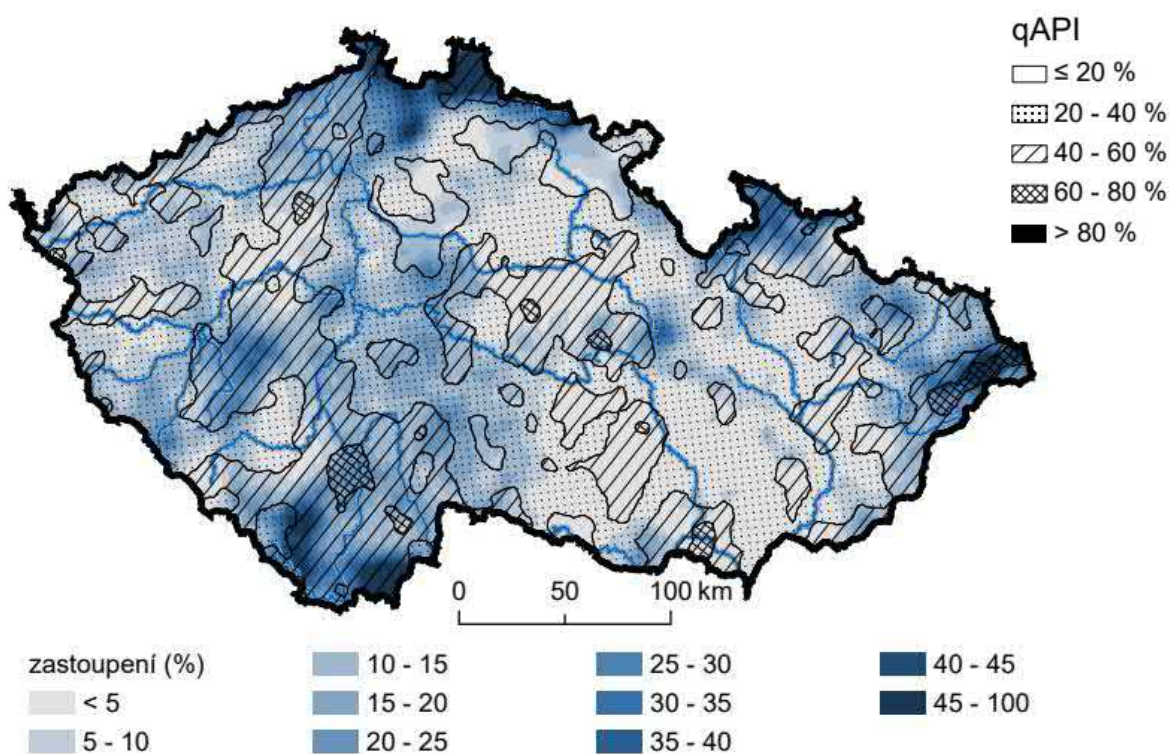
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru D pro dobu opakování 20 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



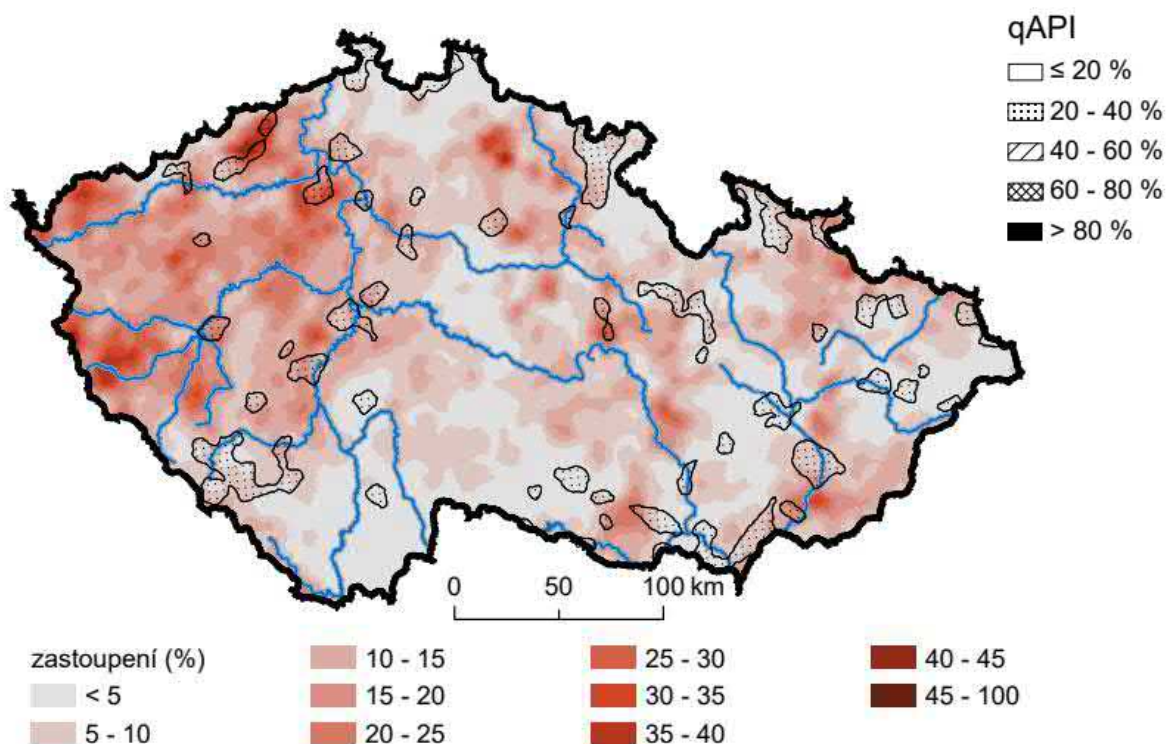
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru E pro dobu opakování 20 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



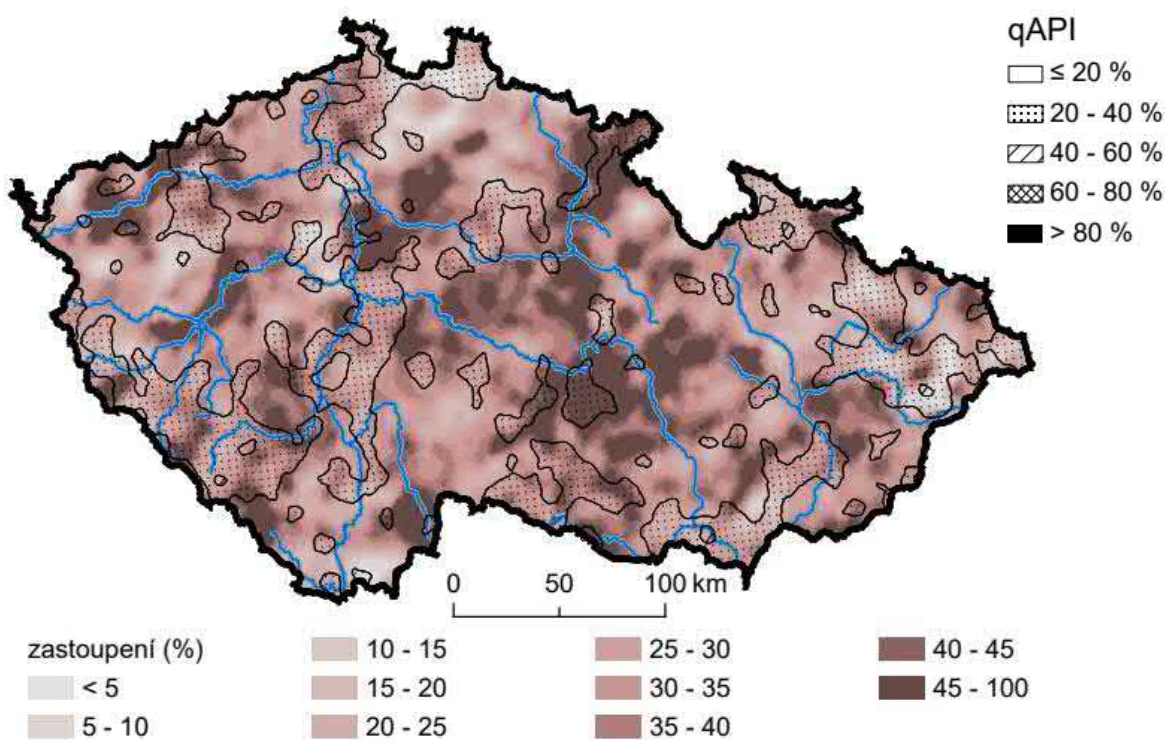
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru F pro dobu opakování 20 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



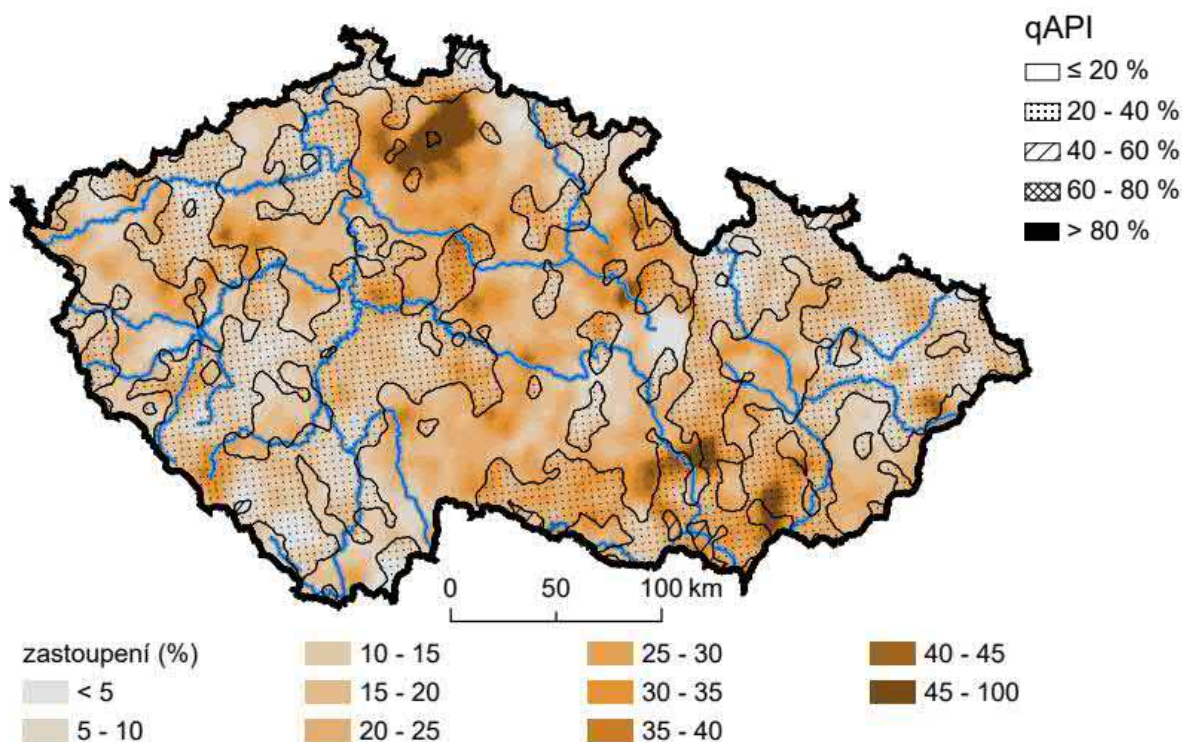
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru A pro dobu opakování 50 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



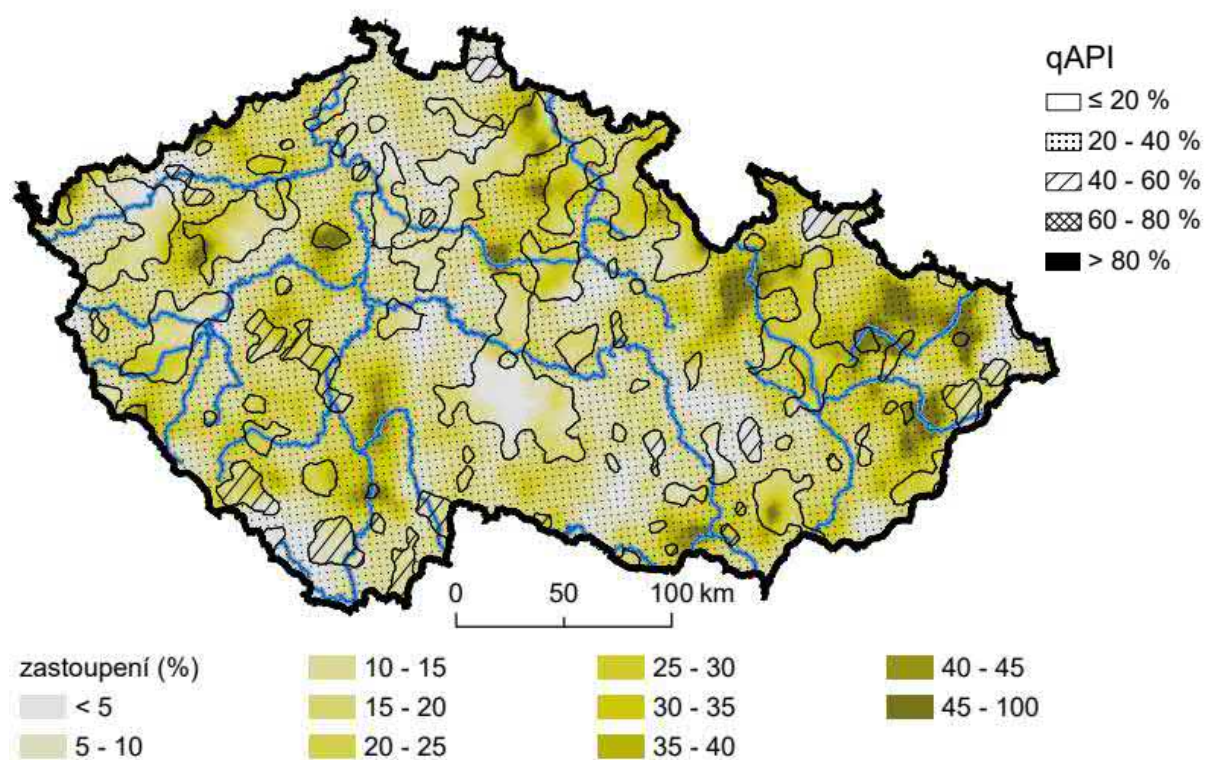
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru B pro dobu opakování 50 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



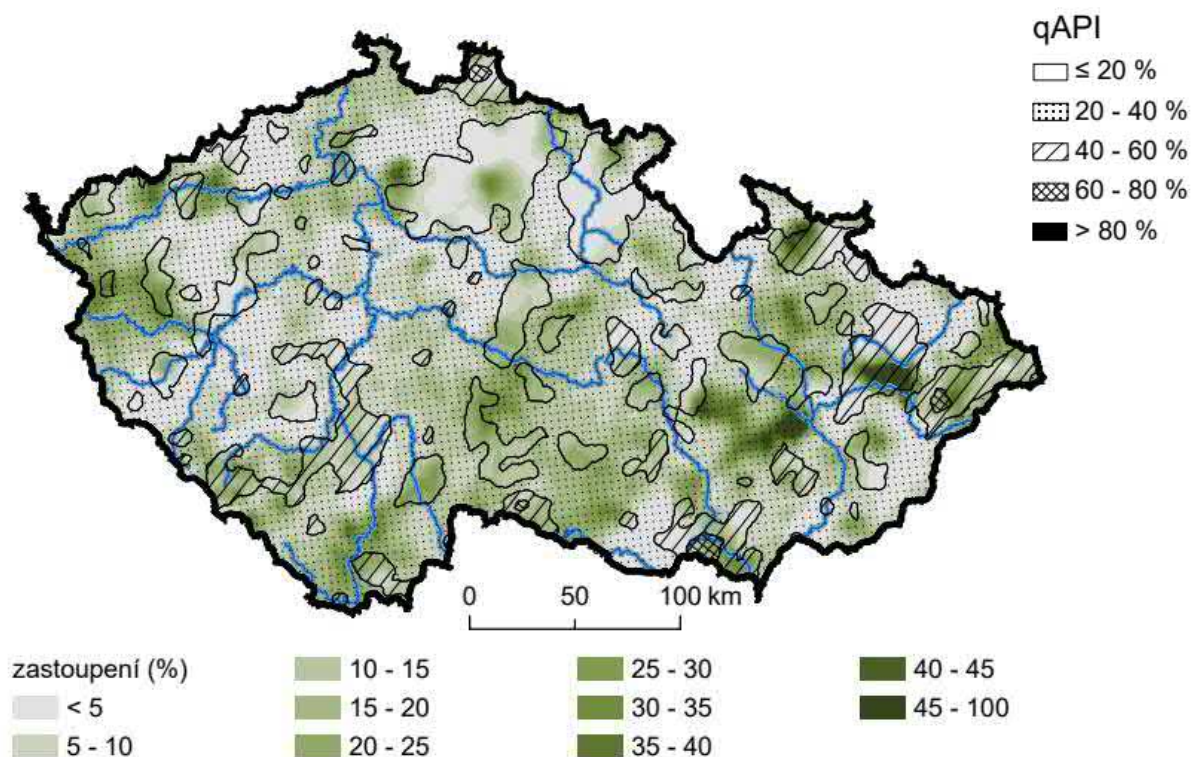
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru C pro dobu opakování 50 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



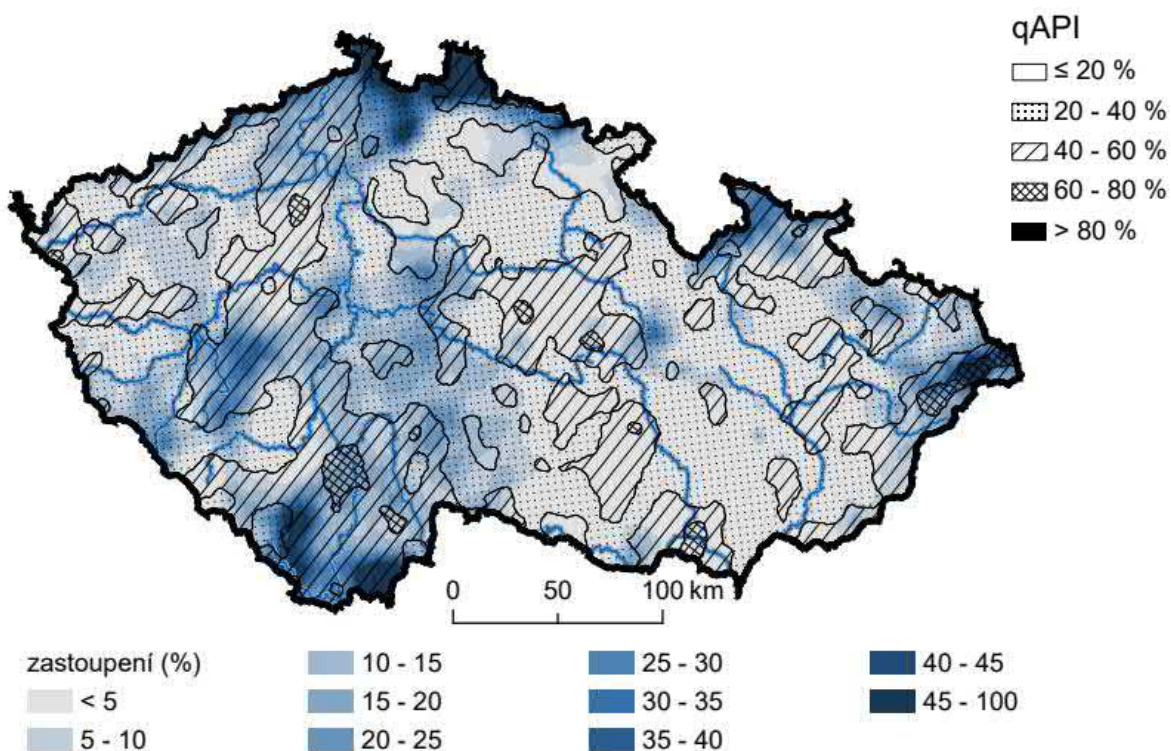
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru D pro dobu opakování 50 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



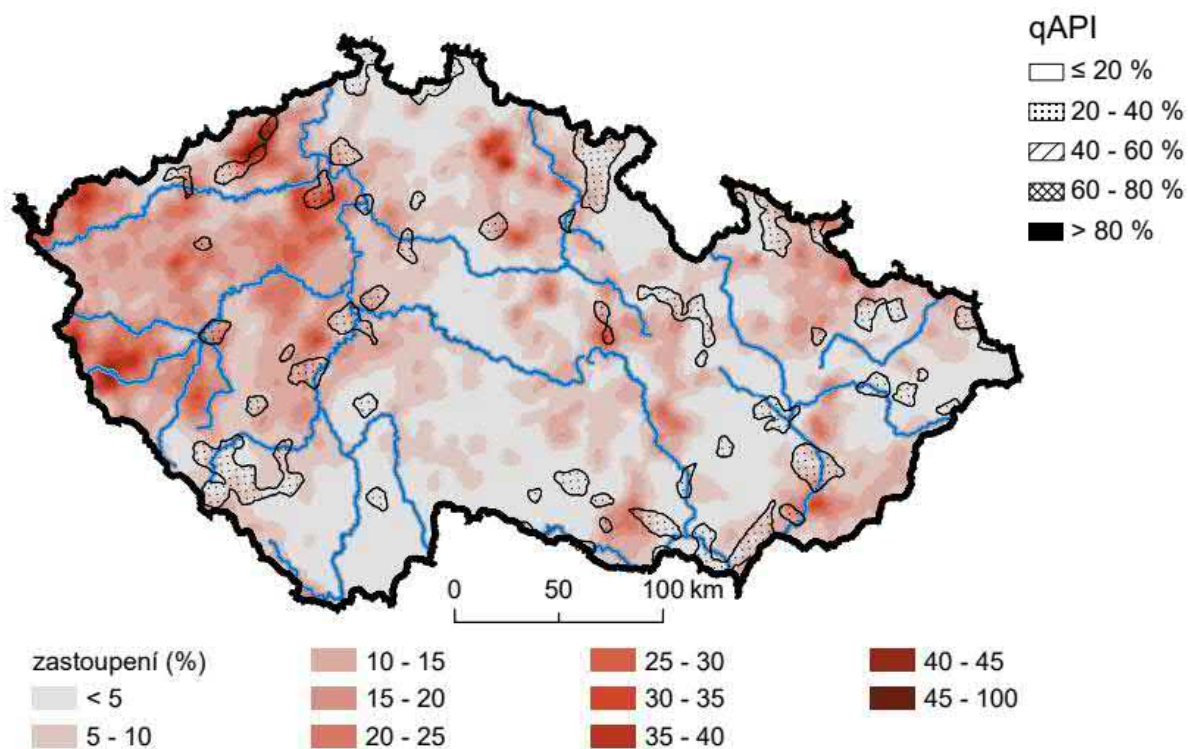
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru E pro dobu opakování 50 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



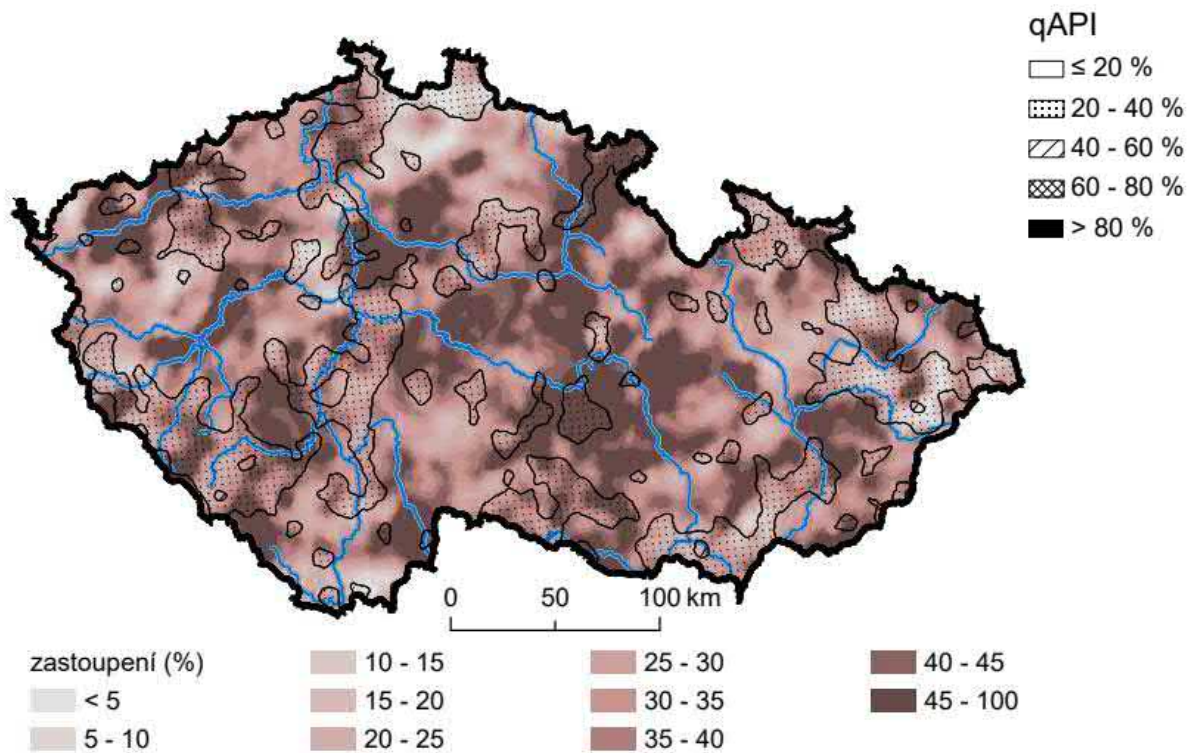
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru F pro dobu opakování 50 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



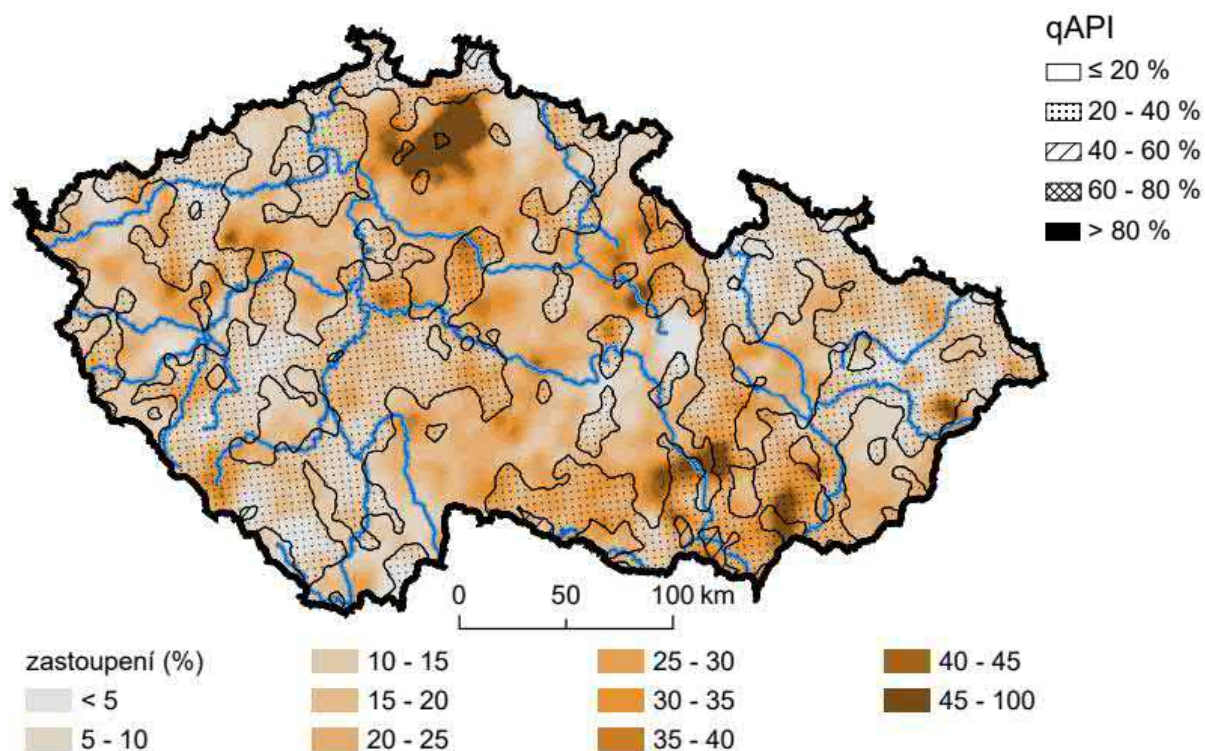
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru A pro dobu opakování 100 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



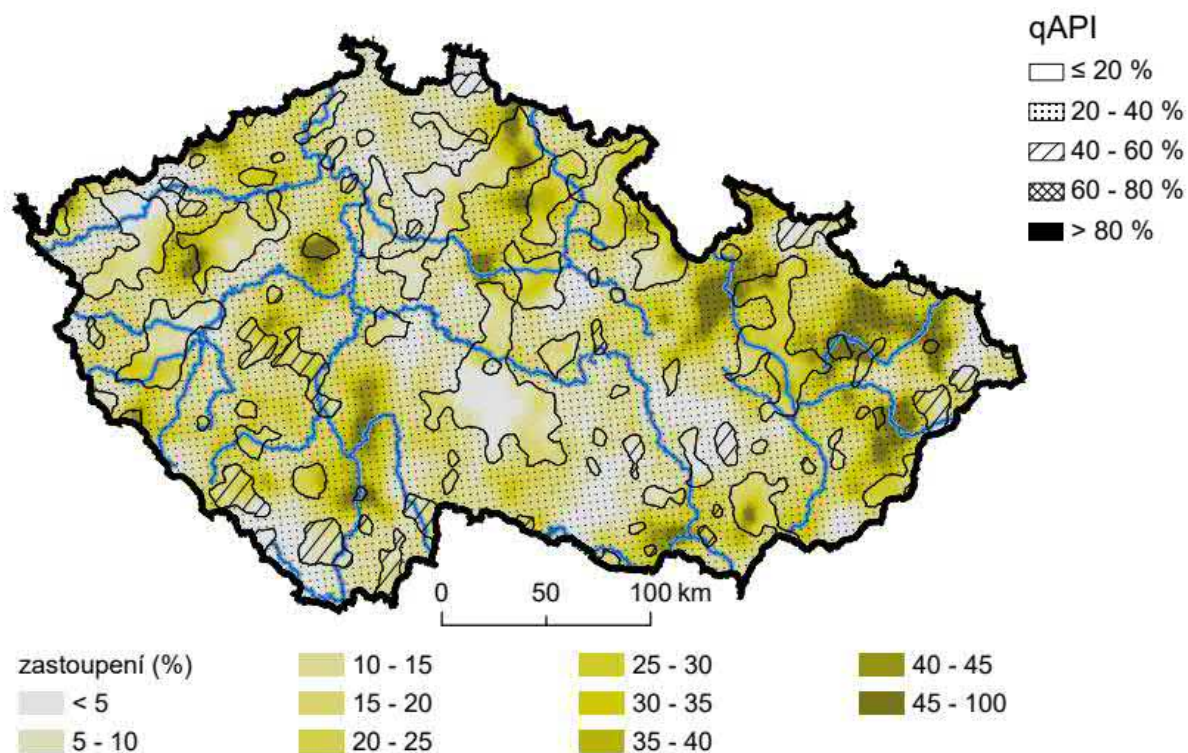
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru B pro dobu opakování 100 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



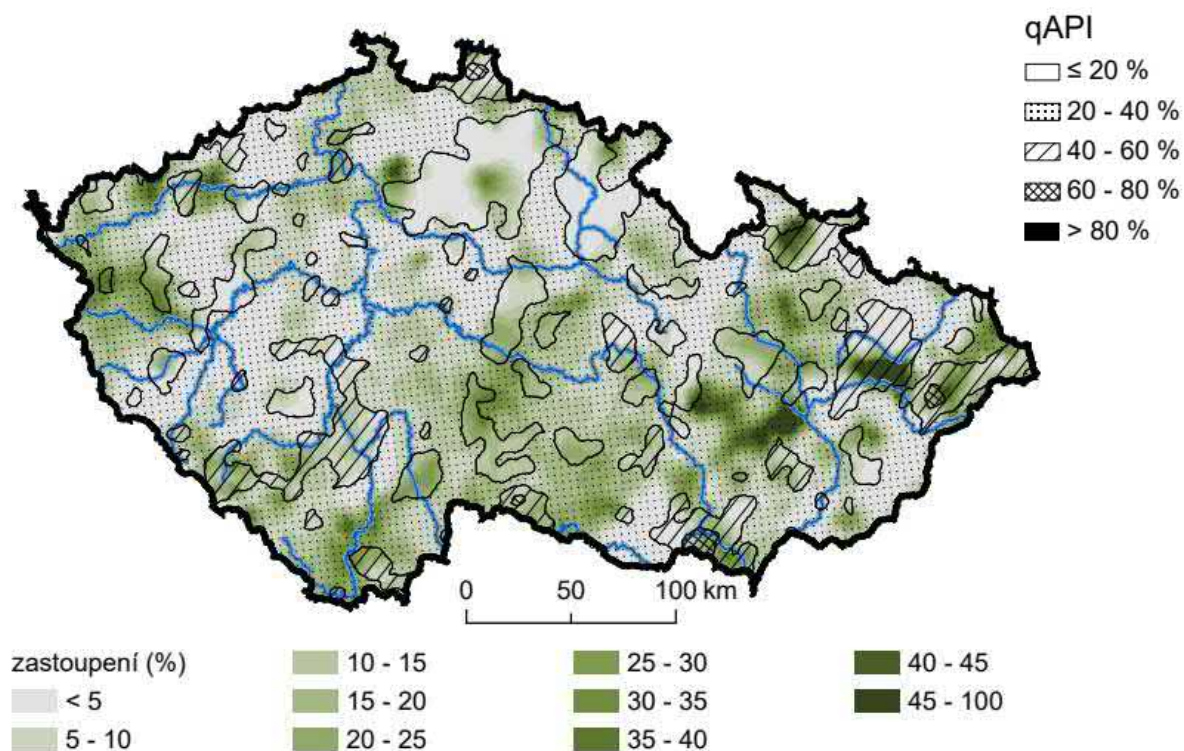
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru C pro dobu opakování 100 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



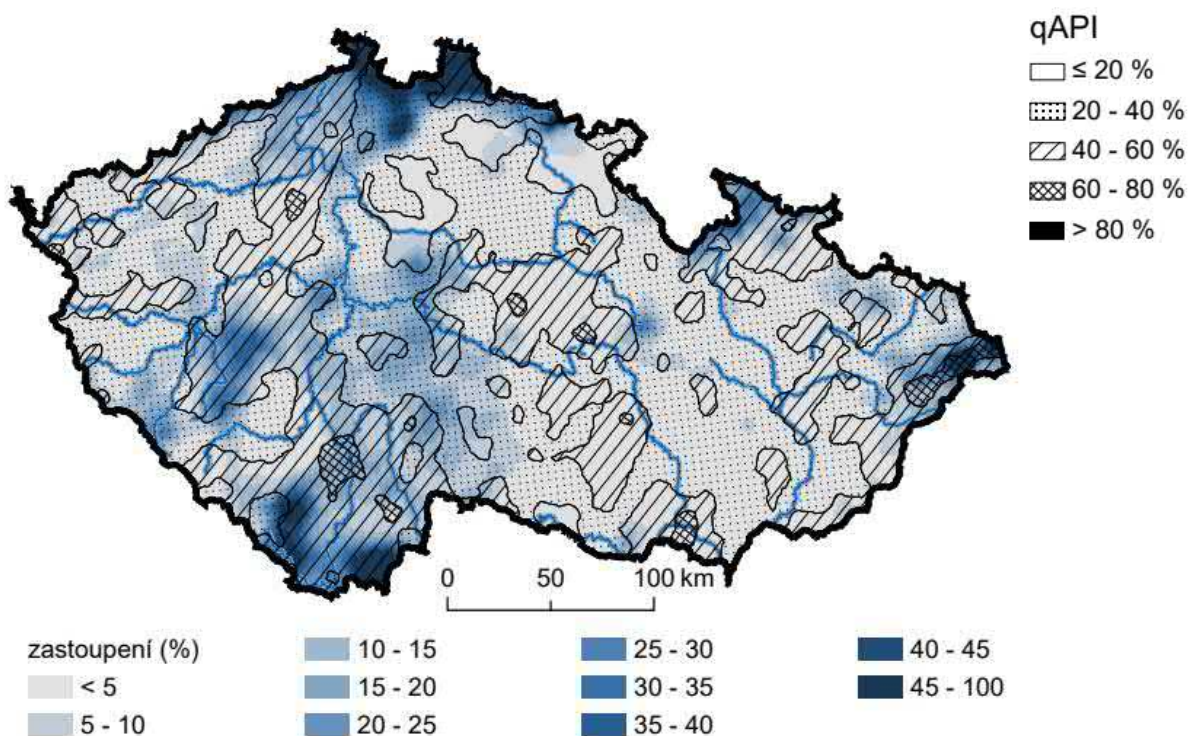
Zastoupení šestihodinové srážky tvaru D pro dobu opakování 100 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



Zastoupení šestihodinové srážky tvaru E pro dobu opakování 100 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení



Zastoupení šestihodinové srážky tvaru F pro dobu opakování 100 let s vyznačením pravděpodobnosti abnormálního nasycení





Metodika vznikla jako výstup projektu NAZV QK1910029 „Předchozí nasycenost a návrhové srážkové intenzity jako faktory odtokové odezvy na malých povodích“ řešeného v letech 2019 - 2022.

ISBN: 978-80-01-07115-1